

ИМПУЛЬСНАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ УЛЬТРАЗВУКА В ЖИДКОСТЯХ ПОД ДАВЛЕНИЕМ ДО 2000 атм

А. С. КАГРАМАНЯН, А. Л. БАДАЛЯН

Описана экспериментальная установка для измерения скорости ультразвука в жидкостях при давлениях до 2000 атм в интервале температур $30 \div 100^\circ\text{C}$ с погрешностью не более 0,2%. Показано согласие полученных нами значений скорости ультразвука в жидком *n*-гексане и толуоле с известными наиболее надежными данными. Приводятся результаты измерений скорости ультразвука в жидком полиэтилсилоксане-2 (ПЭС-2) в указанном интервале температур и давлений. Установлено, что в этих условиях скорость ультразвука в жидком ПЭС-2 с точностью до погрешности эксперимента по изотермам изменяется по нелинейному закону.

Для изучения строения и физических свойств вещества все более широко используются акустические методы исследования, отличающиеся сравнительной простотой и достаточно высокой точностью получаемых с их помощью результатов [1—7].

В последнее время появился целый ряд работ, посвященных измерению скорости ультразвука в жидкостях в зависимости от давления и температуры. Экспериментальное исследование скорости ультразвука в жидкостях при высоких давлениях и температурах имеет как большое научно-теоретическое, так и прикладное значение. Знание скорости ультразвука не только позволяет рассчитать многие термодинамические свойства исследуемых жидкостей в зависимости от давления и температуры, но и является одним из чувствительных параметров для исследования внутренней структуры жидкостей [8—15].

Для измерения скорости ультразвука в жидких средах наиболее часто используются оптический, интерферометрический и импульсный методы. Однако оптический и интерферометрический методы мало пригодны для исследований при высоких давлениях, так как при их использовании сильно усложняется конструкция измерительной камеры. От этого недостатка свободен импульсный метод фиксированного расстояния.

В настоящей статье описана импульсная установка для измерения скорости ультразвука в жидкостях при давлениях до 2000 атм и температурах $30 \div 100^\circ\text{C}$. Была использована импульсно-фазовая методика одного фиксированного расстояния на частоте 2,8 МГц.

Основной частью установки является автоклав высокого давления (рис. 1). В основу автоклава была положена схема, предложенная в работе [11], в которую внесены некоторые изменения. Сконструированная нами измерительная камера давала возможность производить измерение скорости ультразвука одновременно в двух жидкостях. Автоклав высокого давления представляет собой толстостенный цилиндр 1 из термически обработанной стали 45ХМНФА. Торцовые затворы 2 являются электро-

вводами высокого давления известной конструкции [16]. На электропроводах укреплены акустические ячейки 3, которые помещены в тефлоновые сильфоны 4 малой жесткости. Необходимое давление в измерительной камере создавалось и измерялось грузопоршневым манометром МП-2500 класса точности 0,05. Передающая давление жидкость подавалась в автоклав через штуцер 5, соединенный капилляром с грузопоршневым манометром. Пространство между сильфонами заполнялось окрашенной жидкостью для быстрого и надежного контроля чистоты исследуемых жидкостей.

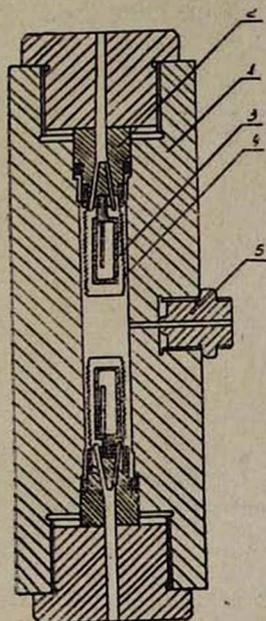


Рис. 1. Автоклав высокого давления (измерительная камера).

Впервые в подобных измерениях вместо кварцевых пластин нами были использованы пластины из кристалла ниобата лития, которые выделяются среди других пьезоэлектрических материалов большой скоростью продольных ультразвуковых волн и хорошими пьезоэлектрическими свойствами. Пластины из ниобата лития прижимаются к торцам внутреннего цилиндра посредством плоских пружин и соответствующей гайкой, перемещающейся по внутренней резьбе внешнего цилиндра. Расстояние между приемным и излучающим пластинами ($l = 34,920$ мм) измерялось на ИЗВ-2 с погрешностью ± 2 мкм при комнатной температуре.

При других температурах вводилась поправка на линейное расширение.

Термостатирование исследуемых веществ осуществлялось погружением автоклава в жидкостный термостат ТС-24, который позволял поддерживать заданную температуру с точностью $\pm 0,05^\circ\text{C}$. Температура измерялась платиновым термометром сопротивления 8, помещенным непосредственно в исследуемую жидкость и закрепленным на корпус электропровода. Ошибка в измерении температуры не превышала $0,05^\circ\text{C}$.

Блок-схема электронной части установки представлена на рис. 2. Принцип действия аналогичного электронного блока подробно описан в литературе [17].

Скорость распространения ультразвука можно определить по формуле

$$c = \frac{2l}{\tau_2 - \tau_1},$$

где l — расстояние между излучающей и приемной пластинами, τ_1 и τ_2 — время задержки импульсов второго канала генератора относительно первого для первого и второго «пакетов». Для жидкостей с малым поглощением можно использовать третий и первый «пакеты»; тогда

$$c = \frac{4l}{\tau_3 - \tau_1}$$

При таком способе исключается необходимость введения поправки на неустойчивость нуля задержки, изменения собственной частоты индатора от

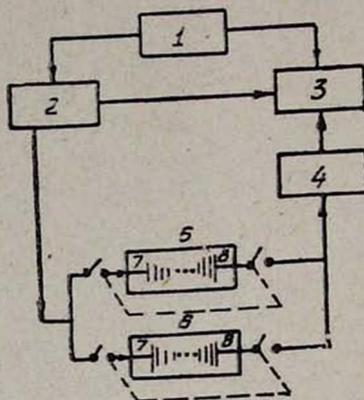


Рис. 2. Блок-схема электронной части установки: 1 — генератор Г5-15, 2 — генератор Г5-4Б, 3 — осциллограф С1-8, 4 — широкополосный усилитель УШ-10, 5, 6 — акустические ячейки.

температуры и давления, на переходные процессы в усилителе УШ-10 и осциллографе.

Суммарная относительная ошибка определения скорости ультразвука c в зависимости от давления P и температуры T

$$\frac{\delta c}{c} \Big|_{P, T} = \frac{\delta l}{l} + \frac{\delta \tau}{\tau} + \frac{1}{c} \left(\frac{\partial c}{\partial P} \right)_T \delta P + \frac{1}{c} \left(\frac{\partial c}{\partial T} \right)_P \delta T \quad (1)$$

составляет на нашей установке не более $\pm 0,2\%$.

Для проверки созданной экспериментальной установки нами была проведена серия контрольных измерений. В табл. 1 приведены результаты контрольных измерений скорости ультразвука в жидких *n*-гексане и толуоле при атмосферном давлении, а в табл. 2 — результаты контрольных измерений скорости ультразвука в *n*-гексане в зависимости от давления. Как следует из таблиц, значения скорости ультразвука, полученные нами, хорошо согласуются с известными наиболее надежными данными [8, 12, 17—19].

Нами были проведены измерения скорости ультразвука в жидком полиэтилсилоксане-2 (ПЭС-2) ($\rho_4^{20} = 0,9423$, $\eta_D^{20} = 1,4463$) в интервале температур $30 \div 100^\circ\text{C}$ и при давлениях до 2000 атм. Результаты измерений скорости ультразвука в жидком ПЭС-2 приведены в табл. 3.

Обработка экспериментальных данных показала, что скорость ультразвука в зависимости от давления по изотермам в жидком ПЭС-2 в исследованном интервале температур и давлений подчиняется соотношению [13]

$$c = \sqrt[3]{c_0^3 + K(P - P_0)}, \quad (2)$$

Таблица 1

t_1 , °C	с, м/с			
	н-гексан		толуол	
	наши изм.	данные других авторов	наши изм.	данные [17]
30	1053	1054 [17] 1054 [18]	1286	1284
40	1009	1009 [8] 1009 [12] 1010 [17]	1242	1241
50	965	965 [8] 966 [17]	1200	1199
60	920	921 [8] 921 [12] 921 [17] 922 [18]	1157	1157
70	875	878 [17]	1118	1117
80	834	834 [17] 835 [18]	1076	1076
90	791	790 [17]	1037	1036
100	747	747 [17] 749 [18]	998	996

Таблица 2

Контрольные измерения скорости ультразвука (м/с) в н-гексане

t , °C	60		80		100	
	наши изм.	данные других авторов	наши изм.	данные [18]	наши изм.	данные [18]
100	1011	1014 [18] 1009 [19]	934	938	862	861
200	1088	1091 [18] 1086 [19]	1020	1022	954	956
400	1217	1220 [18] 1214 [19]	1158	1160	1101	1102
500	1273	1276 [18] 1269 [19]		1217		1163
700	1373	1374 [18]	1318	1320	1269	1270
900	1458	1460 [19]	1409	1410	1361	1362
1000	1499	1500 [18]	1448	1450	1403	1404
1200	1572	1574 [18]	1525	1526	1482	1482
1400	1640	1641 [18]	1595	1595	1553	1552
1600	1704	1704 [18]	1659	1660	1620	1618
1800	1760	1762 [18]	1721	1720	1680	1679
2000	1816	1819 [18]	1778	1776	1739	1737

Скорость ультразвука (м/с) в жидком ПЭС-2 в зависимости от давления и температуры

P (атм)	t°С							
	30	40	50	60	70	80	90	100
1	1174	1140	1109	1078	1047	1017	987	956
100	1229	1197	1167	1137	1109	1082	1054	1025
200	1277	1250	1219	1193	1166	1139	1113	1092
300	1322	1296	1268	1242	1216	1192	1167	1143
400	1365	1339	1313	1288	1263	1240	1216	1193
500	1405	1381	1354	1331	1308	1285	1262	1239
600	1443	1419	1394	1371	1348	1326	1304	1283
700	1478	1458	1427	1408	1387	1366	1345	1323
800	1512	1489	1466	1444	1423	1402	1383	1360
900	1544	1522	1500	1478	1457	1439	1418	1396
1000	1574	1553	1531	1510	1491	1471	1452	1432
1100	1597	1584	1562	1542	1522	1504	1485	1465
1200	1633	1613	1592	1572	1552	1533	1515	1496
1300	1661	1642	1621	1600	1581	1564	1546	1530
1400	1687	1669	1648	1628	1609	1592	1575	1556
1500	1714	1695	1674	1655	1637	1621	1602	1584
1600	1739	1721	1700	1681	1663	1647	1632	1610
1700	1763	1745	1725	1707	1688	1672	1655	1637
1800	1788	1768	1749	1731	1714	1697	1680	1662
1900	1812	1793	1772	1756	1738	1722	1705	1687
2000	1833	1817	1795	1779	1761	1745	1729	1711
$K \left(\frac{м^2}{кг \cdot с} \right)$	22,81	22,66	22,21	21,95	21,62	21,35	21,02	20,65

где c_0 — скорость ультразвука при $P = P_0$, P — приложенное давление, P_0 — атмосферное давление, K — постоянная, зависящая от вещества и температуры. Как видно из уравнения (2), скорость ультразвука при постоянной температуре в зависимости от давления изменяется по нелинейному закону. С повышением давления коэффициент $(dc/dP)_T$ уменьшается, подчиняясь закону, который следует из уравнения (2). Значения коэффициента K , рассчитанные методом наименьших квадратов, при различных температурах приведены в табл. 3. Максимальное отклонение экспериментальных значений скорости ультразвука в ПЭС-2 от значений, рассчитанных по формуле (2), не превышает погрешности эксперимента.

Ереванский политехнический
институт

Поступила 28.I.1978

ЛИТЕРАТУРА

1. И. Г. Михайлов, В. А. Соловьев, Ю. П. Сырников. Основы молекулярной акустики, Изд. Наука, М., 1964.
2. Б. Б. Кудрявцев. Применение ультразвуковых методов в практике физико-химических исследований, ГИТЛ, М.—Л., 1952.

3. В. Ф. Ноздрев. Применение ультразвуки в молекулярной физике, ГИФМЛ, М., 1958.
4. А. Бергман. Ультразвук, ИЛ, М., 1957.
5. W. Schaafs. Molekularakustik, Berlin, 1962.
6. Н. Ф. Отпущенников. Сб. Ультразвук и физико-химические свойства вещества, Курск, 1970, вып. 4, стр. 7.
7. Н. Ф. Отпущенников. Сб. Ультразвук и физико-химические свойства вещества, Курск, 1976, вып. 10, стр. 19.
8. А. А. Бадалян. Кандидатская диссертация, Калинин, 1973.
9. Б. С. Кирьяков, Н. Ф. Отпущенников. Сб. Ультразвук и физико-химические свойства вещества, Курск, 1971, вып. 5, стр. 59.
10. Ю. С. Шойгов, Н. Ф. Отпущенников. Сб. Ультразвук и физико-химические свойства вещества, М., 1969, вып. 3, стр. 80.
11. И. В. Сысоев, Н. Ф. Отпущенников. Сб. Ультразвук и физико-химические свойства вещества, Курск, 1976, вып. 10, стр. 34.
12. J. W. Voelhauser. Physica, 34, 484 (1967).
13. Ю. С. Шойгов, Г. М. Панькевич, Н. Ф. Отпущенников. Теплоэнергетика, 10, 76 (1968).
14. Б. С. Кирьяков, Н. Ф. Отпущенников. Сб. Ультразвук и физико-химические свойства вещества, Курск, 1973, вып. 7, стр. 7.
15. И. В. Сысоев, Н. Ф. Отпущенников. Сб. Ультразвук и физико-химические свойства вещества, Курск, 1977, вып. 11, стр. 18.
16. Д. С. Циклис. Техника физико-химических исследований при высоких и сверхвысоких давлениях, М., 1976.
17. В. В. Зотов, Ю. А. Неручев, Н. Ф. Отпущенников. Сб. Ультразвук и физико-химические свойства вещества, М., 1969, вып. 3, стр. 25.
18. Б. С. Кирьяков, П. П. Панин. Сб. Ультразвук и физико-химические свойства вещества, Курск, 1972, вып. 6, стр. 132.
19. R. Kling, M. E. Nicolini, J. Tissot. La recherche aeronautique, № 31, 31 (1953).

ՀԵՂՈՒԿՆԵՐՈՒՄ ՈՒՆԻՐԱԶՄՆԵՒ ԱՐԱԳՈՒԹՅՈՒՆԸ ՄԻՆՉԵՎ 2000 մրժ
ՃՆՇՄԱՆ ՏԱԿ ՉԱՓՈՂ ՓՈՐՁԱՐԱՐԱԿԱՆ ՀԱՐՄԱՐԱՆԲ

Լ. Ս. ՂԱԶՐԱՄՅԱՆ, Ա. Լ. ԲԱԴԱԼՅԱՆ

Նկարագրված է հեղուկներում ուլտրաձայնի արագությունը չափող փորձարարական հարմարանք՝ մինչև 2000 մրժ ճնշման տակ և 30—100°C ջերմաստիճանային միջակայքում, ոչ ավելի, քան 0,2% չափման սխալով: Ցույց է տրված հեղուկ նորմալ-հեքսանում և թուլուոլում ստացված ուլտրաձայնի արագության արժեքների համապատասխանությունը առավել հուսալի հայտնի տվյալների հետ: Բերված են ուլտրաձայնի արագության արժեքները հեղուկ պոլիէթիլ-սիլոքսան-2-ում (ՊԵՍ-2) ճնշման և ջերմաստիճանային նշված միջակայքերում: Ուրոշվել է, որ ուլտրաձայնի արագությունը հեղուկ ՊԵՍ-2-ում, փորձի սխալի ճշտության սահմաններում, էղոթերներով փոփոխվում է ոչ զծային օրենքով՝ հետազոտված պայմաններում:

PULSED EXPERIMENTAL ARRANGEMENT FOR MEASUREMENTS
OF ULTRASOUND VELOCITY IN LIQUIDS UNDER
PRESSURE UP TO 2000 atm

L. S. KAGRAMANYAN, A. L. BADALYAN

The experimental apparatus is described for the measurement of ultrasound velocity in liquids at pressures up to 2000 atm and temperature ranging from 30 to 100°C with error no more than 0,2%. The agreement of our data on the velocity of ultrasound in liquid N-hexane and toluol with the most reliable available data is shown. The data in liquid polyethylsiloxane-2 (PES-2) are given for these temperatures and pressures.