

Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

П. С. Попель, Д. А. Ягодин, А. Г. Мозговой, М. А. Покрасин, Экспериментальное исследование скорости звука в расплавленных свинце, висмуте и их взаимном эвтектическом сплаве при высоких температурах, *ТВТ*, 2010, том 48, выпуск 2, 198–205

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением
<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 18.97.9.170

23 января 2025 г., 13:29:11



УДК 534.221:546.815.86.815'86

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СКОРОСТИ ЗВУКА В РАСПЛАВЛЕННЫХ СВИНЦЕ, ВИСМУТЕ И ИХ ВЗАИМНОМ ЭВТЕКТИЧЕСКОМ СПЛАВЕ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

© 2010 г. П. С. Попель*, Д. А. Ягодин*, А. Г. Мозговой**, М. А. Покрасин***

*Уральский государственный педагогический университет, г. Екатеринбург

**Объединенный институт высоких температур РАН, Москва

***Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, Москва

Поступила в редакцию 20.06.2009 г.

Импульсно-фазовым методом измерена скорость звука в жидких свинце, висмуте и свинец-висмутовой эвтектике в диапазоне от температуры плавления до 1380 К. Чистота исследованных металлов составляла не менее 99.99 мас. %. Доверительная погрешность результатов экспериментов не превышала 0.3%. Полученные опытные данные сравниваются с имеющимися в литературе.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время Росатом РФ разрабатывает основные положения стратегии развития атомной энергетики России на период до 2050 г., а Российская академия наук – дорожную карту инновационного развития атомной энергетики России в первой половине XXI века. В соответствии с этими основополагающими документами ядерным реакторам на быстрых нейтронах с жидкометаллическими теплоносителями в их первом контуре придается важное значение в структуре большой энергетики страны. Так, планируется создать и ввести в эксплуатацию несколько блоков быстрых реакторов типа БН-800 и БРЕСТ-300 с натриевым и свинцовым теплоносителями соответственно, а вместо выработавших свой ресурс и выводимых из эксплуатации водо-водяных ядерных реакторов на тепловых нейтронах типа ВВЭР-440 предполагается устанавливать моноблочные ядерные реакторы на быстрых нейтронах типа СВБР 75/100 со свинец-висмутовым теплоносителем.

Поэтому экспериментальное исследование теплофизических свойств тяжелых жидкометаллических теплоносителей (ТЖМТ), таких, как свинец, висмут и их взаимный двойной сплав эвтектического состава (44.5 мас. % Pb + 55.5 мас. % Bi [1]), температура плавления которого составляет 398,1 К по Международной температурной шкале 1990 г. (МТШ-90) [2], и разработка на их основе рекомендуемых справочных данных представляют большой интерес для проектировщиков и создателей быстрых реакторов-бридеров. При этом наиболее информативным свойством среди них является скорость звука в конденсированной фазе. Действительно, по скорости звука в жидкоме-

таллических теплоносителях можно рассчитать их трудноопределимые опытным путем изотермическую сжимаемость и отношение теплоемкостей при постоянном давлении и объеме в расплавленном состоянии.

Однако скорость звука в жидких ТЖМТ изучена до сих пор недостаточно полно, а в справочных изданиях, появившихся в литературе за последние годы, она либо вообще не рассматривается [3], либо ей уделяется мало внимания [4]. В связи с этим для составления более точных и надежных справочных данных о скорости звука в расплавленных ТЖМТ была исследована ее температурная зависимость для жидких свинца, висмута и свинец-висмутовой эвтектики в диапазоне от температуры плавления до ~1400 К.

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Скорость звука в металлических расплавах исследовалась импульсно-фазовым методом на опытной установке, принципиальная схема, измерительная ячейка и конструкция которой представлены на рис. 1 и 2. Этот метод измерения является абсолютным, так как не требует какой-нибудь предварительной калибровки. Он основывается на определении длины волны λ и частоты f звука, а скорость звука рассчитывается по следующей формуле:

$$a = \lambda f. \quad (1)$$

Генератор типа Г5-72 вырабатывал прямоугольные электрические сигналы длительностью 1–5 мкс и частотой следования 2 кГц, которые в свою очередь формировали радиоимпульсы из высокочастотного ($f = 31.33$ МГц) синусоидаль-

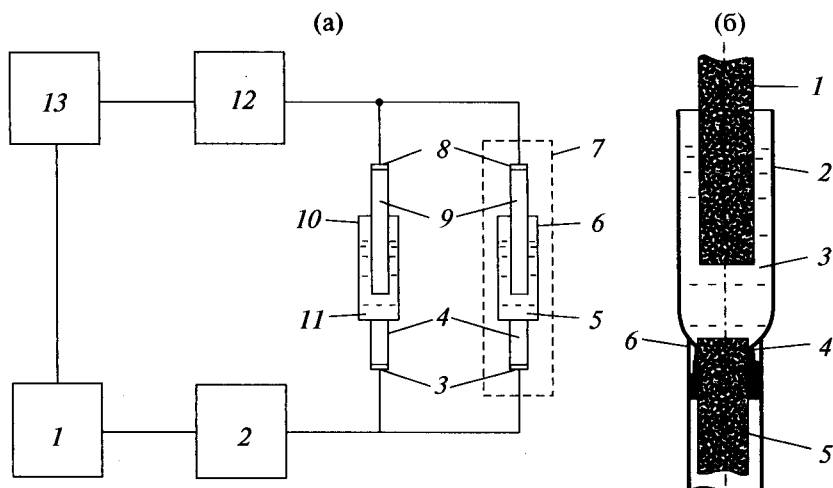


Рис. 1. Экспериментальная установка для измерения скорости звука в металлических расплавах. (а) — принципиальная схема опытной установки: 1 — генератор импульсных сигналов; 2 — генератор синусоидальных сигналов; 3, 8 — пьезоэлементы; 4, 9 — звукопроводы; 5 — исследуемый жидкий металл; 6 — контейнер для металлического расплава; 7 — нагревательная печь; 10 — контейнер для эталонной жидкости; 11 — эталонная жидкость; 12 — селективный усилитель; 13 — осциллограф. (б) — измерительная ячейка: 1 — верхний звукопровод; 2 — контейнер для жидкого металла; 3 — металлический расплав; 4, 6 — термопары; 5 — нижний звукопровод.

ного напряжения от генератора типа Г4-151 со встроенным синхронизирующим частотомером. Эти импульсы, амплитуда которых могла плавно регулироваться от 0 до 1.2 В, подавались на нижние излучающие пьезоэлементы измерительной и эталонной ячеек одной и той же конструкции, соединенных параллельно друг с другом. Причем рабочая ячейка заполнялась исследуемым металлическим расплавом, а эталонная — дистиллированной водой.

Зондирующие сигналы в виде акустических импульсов проходили через элементы измерительной и эталонной ячеек и поступали на их верхние приемные пьезоэлементы, где снова преобразовывались в электрические импульсы. Так как времена задержки акустических сигналов в обеих ячейках подбирались примерно одинаковыми, то электрические импульсы на их выходе, передаваемые по соединительной цепи, интерферировали между собой. Результаты этой интерференции усиливались в селективном приемнике и наблюдались на экране осциллографа типа С1-70.

Верхний звукопровод измерительной ячейки мог перемещаться вдоль ее вертикальной оси. Его перемещение измерялось часовым микрометром типа ИЧ-25 с ценой деления 0.01 мм. При этом на осциллографе фиксировалась последовательность экстремумов интерференционных сигналов, расстояния между которыми равнялись длине звуковой волны.

Длина этой волны может быть рассчитана по формуле

$$\lambda = \Delta h/n, \tag{2}$$

где n — число минимумов акустического колебания, появившихся на экране осциллографа при перемещении верхнего звукопровода измерительной ячейки на Δh , а скорость звука в исследуемой жидкости с учетом соотношений (1) и (2)

$$a = (\Delta h/n)f. \tag{3}$$

Несущая частота f акустических колебаний, равная 31.33 МГц, измерялась электронным частотомером с абсолютной погрешностью ± 50 Гц, что составляет в относительных единицах около $\pm 2 \times 10^{-4}\%$. Поэтому для повышения точности проводимых экспериментов необходимо увеличивать число фиксируемых минимумов звуковой волны, т.е. увеличивать акустическую базу этих измерений.

В качестве материала основных элементов измерительной и эталонной ячеек, в том числе и их нижних и верхних звукопроводов, применялся плавный кварц. Для излучающих и приемных пьезопреобразователей использовался цирконат-титанат свинца в виде круглых пластинок диаметром 5–10 мм и толщиной 0.3–0.7 мм. Эта керамика обладает наилучшими электромеханическими свойствами среди других подобного рода материалов. Она отличается более широкими резонансными полосами и меньшим напряжением возбуждения по сравнению с кварцевыми пьезоэлементами. Так, при амплитуде входных электрических импульсов более 0.5 В в ней возбуждаются достаточно мощные акустические колебания.

Известно [5], что для уменьшения погрешностей акустических измерений, вызываемых дифракционными явлениями, необходимо соблюдать условие $D/\lambda \geq 30$, при котором D — диаметр

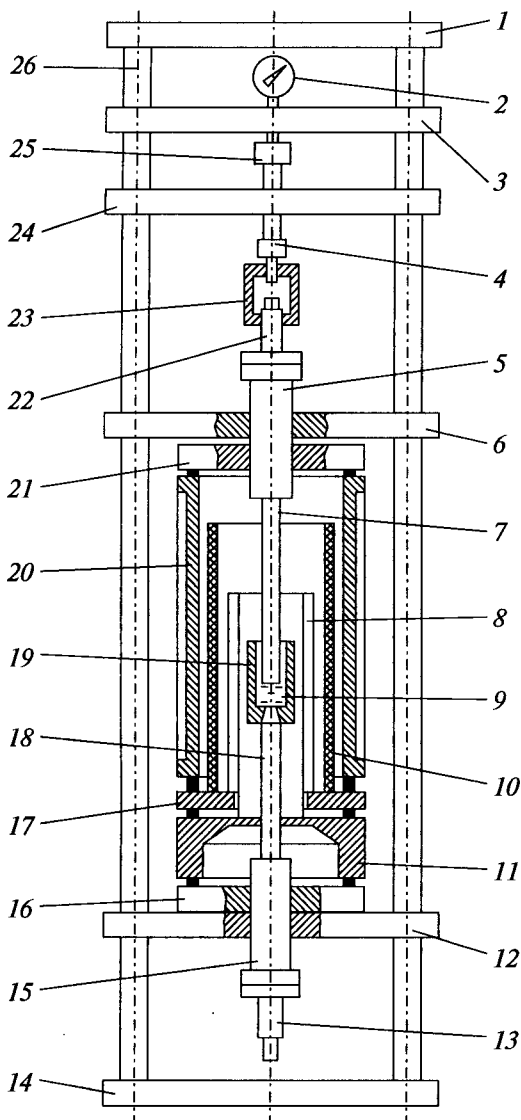


Рис. 2. Конструкция опытной установки для измерения скорости звука в жидких металлах: 1, 3, 6, 12, 24 – установочные платформы; 2 – индикаторный микрометр; 4 – опорное гнездо; 5, 15 – конусные держатели; 7, 18 – верхний и нижний звукопроводы соответственно; 8 – нагревательная печь; 9 – металлический расплав; 10 – радиационный экран; 11, 17 – токовводы печи; 13 – нижний волновод; 14 – массивное основание; 16, 21 – нижний и верхний фланцы соответственно; 19 – рабочая ампула; 20 – корпус печи; 22 – волновод; 23 – соединительная муфта; 25 – микрометрический винт; 26 – стойки.

звуковых излучателей и приемников. Исходя из технологических соображений, диаметр звукопроводов выбирался равным 14 мм, что в полной мере удовлетворяло вышеуказанному условию. Этот диаметр определял диаметр измерительной и эталонной ячеек (20–25 мм) и внутренний диаметр трубчатой нагревательной печи (≥ 30 мм). При длине печи около 200 мм для нагрева метал-

лического расплава до температуры 1500 К требовалась электрическая мощность ~ 2 кВт.

Для обеспечения надежного акустического контакта между кварцевыми звукопроводами и жидким металлом на их торцы наносился тонкий промежуточный слой борного ангидрида [6]. Поскольку он размягчался при температуре около 750 К, основные измерения начинались именно с этой температуры. При этом эксперименты проводились как при нагреве, так и при охлаждении металлического расплава с изотермическими выдержками в течение не менее 20 мин при каждой рабочей температуре.

Температура жидкого металла в измерительной ячейке контролировалась двумя хромель-алюмелевыми термопарами градуировки К [6], поверенными по месту их установки (см. рис. 16) по реперным точкам МТШ-90 – температурам затвердевания галлия, олова, алюминия и серебра. При этом их погрешность составляла ± 0.2 К при температуре до 1000 К и ± 0.3 К при более высоких температурах.

Измерительная ячейка размещалась внутри рабочей камеры экспериментальной установки (см. рис. 2). Эта камера располагалась между нижней и верхней платформами и состояла из водоохлаждаемого корпуса со съемными нижним и верхним фланцами. Во фланцах были устроены проходы для звукопроводов, а также трубчатой электрической печи сопротивления с двумя коаксиальными радиационными экранами, пространство между которыми было заполнено теплоизолирующей набивкой, и водоохлаждаемых токовводов. Отдельные элементы камеры соединялись между собой на герметичных прокладках из вакуумной резины, которые одновременно позволяли осуществлять юстировку излучающего и приемного звукопроводов измерительной ячейки по вертикали относительно друг друга. Сама юстировка производилась тремя винтами, с помощью которых верхний фланец прикреплялся к верхней платформе.

Оба звукопровода зажимались в двухстенных холодильниках-держателях специальными конусными зажимами и резиновыми уплотнителями. В эти держатели ввинчивались нижний и верхний волноводы. При этом верхний волновод оканчивался цилиндрической муфтой с прорезями для вывода высокочастотного кабеля, к которой на шарикоподшипниковой опоре присоединялось гнездо для штыря микрометрического винта. Перемещение верхнего звукопровода, задаваемое этим винтом, регистрировалось затем индикаторным микрометром.

Через нижний фланец рабочей камеры выводились термоэлектродные провода измерительных термопар, а также линия вакуумной и газовой систем экспериментального стенда. Высокотемпературная нагревательная печь представляла

Таблица 1. Химический состав исследованных металлов

Металл	Содержание химических элементов, мас. %											
	Fe	Ni	Cu	Zn	As	Ag	Cd	Sb	Hg	Tl	Pb	Bi
Свинец	1×10^{-5}	1×10^{-5}	1×10^{-5}	2×10^{-5}	—	1×10^{-5}	1×10^{-5}	3×10^{-5}	5×10^{-5}	1×10^{-5}	99.9996	5×10^{-5}
Висмут	1×10^{-3}	—	1×10^{-4}	5×10^{-4}	7×10^{-5}	2×10^{-5}	5×10^{-5}	2×10^{-5}	—	—	1×10^{-2}	99.98

собой две последовательно соединенные коаксиальные графитовые трубы, электрический ток по которым протекал в противоположных направлениях, что исключало возможность появления переменного магнитного поля и связанной с ним погрешности при исследовании акустических свойств проводящих металлических расплавов.

Перед началом основных измерений образец исследуемого металла или сплава в виде кусочков различных размеров загружался в измерительную ячейку. После этого опытная установка откачивалась при вакууме 1×10^{-2} мм рт.ст. в течение часа и затем заполнялась гелием высокой чистоты. Такая процедура промывки внутреннего пространства установки повторялась несколько раз. Окончательно давление инертного газа в ней устанавливалось на уровне ~ 0.1 МПа.

В экспериментах применялись высокочистые металлы: свинец марки С00 по ГОСТ 22861-93 и висмут марки Ви00 по ГОСТ 10928-90, химический состав которых по данным завода-изготовителя представлен в табл. 1. Свинец-висмутовый сплав эвтектического состава приготавливался весовым способом путем сплавления в вакууме чистых свинца и висмута. Проведенный в специализированной химико-аналитической лаборатории химический анализ нескольких проб этой эвтектики показал, что содержание в ней свинца составляло в среднем 44.6 мас. % и висмута — 55.4 мас. %. Погрешность такого анализа оценивалась равной ± 0.2 мас. %.

Дополнительно после основных измерений определялось содержание металлических примесей в исследованных металлах. Анализы выполнялись масс-спектрометрическим методом в специализированной масс-спектрометрической и газ-хроматографической лаборатории. Они показали, что чистота Pb, Bi и эвтектического сплава системы Pb-Bi в процессе проведения исследований практически не изменялась.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

Было проведено экспериментальное исследование скорости звука в жидких свинце, висмуте и свинец-висмутовой эвтектике в широком температурном интервале. Результаты этих экспериментов даны на рис. 3 и в табл. 2, где температура

указана по МТШ-90. Доверительная погрешность полученных опытных данных, объединяющая систематическую и случайную составляющие, рассчитывалась по методике [7] и составляла 0.2% при температурах до 1000 К и 0.3% при более высоких температурах.

Для расплавленных висмута и эвтектического сплава Pb-Bi было выполнено три и две серии измерений соответственно. Результаты каждой серии обрабатывались отдельно друг от друга методом наименьших квадратов (МНК) в интерпретации [8]. В качестве аппроксимирующего уравнения выбирался полином по целым степеням абсолютной температуры вида

$$a = b_0 + b_1T + b_2T^2 + \dots, \tag{4}$$

где a — скорость звука в исследованных металлических расплавах в м/с; T — температура, К.

Регрессионно-статистический анализ результатов этой обработки с использованием критерия Фишера [9] показал, что во всех случаях оптимальным является квадратичное аппроксимирующее уравнение (4). На основе указанного анализа можно было сделать вывод о том, что между опытными данными отдельных серий о скорости звука в жидких висмуте и свинец-висмутовой эв-

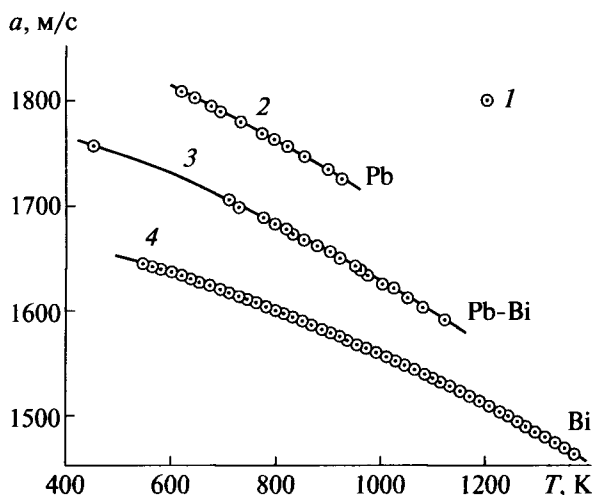


Рис. 3. Температурная зависимость скорости звука в расплавленных свинце, висмуте и свинец-висмутовой эвтектике: 1 — экспериментальные точки; 2-4 — аппроксимирующее уравнение (4).

Таблица 2. Опытные данные о скорости звука в жидких исследованных металлах

T, К	a, м/с	T, К	a, м/с	T, К	a, м/с
Свинец					
614.0	1810.2	727.9	1781.9	848.9	1747.3
640.0	1802.8	767.9	1770.1	891.9	1733.8
670.0	1794.3	789.4	1764.1	919.0	1727.3
687.9	1790.0	815.4	1757.0	—	—
Висмут					
1-я серия		2-я серия		1219.9	1505.0
1375.7	1464.3	759.9	1610.7	1226.6	1502.5
1350.7	1469.5	769.9	1610.1	1234.9	1499.1
1325.8	1476.1	789.9	1605.8	1239.8	1497.3
1300.8	1481.2	799.9	1605.3	1249.8	1496.1
1274.8	1489.4	809.9	1601.4	1259.8	1493.0
1250.8	1495.9	819.9	1598.2	1269.8	1489.7
1225.9	1507.2	829.9	1596.2	1284.9	1485.7
1200.9	1508.0	834.9	1549.5	1299.8	1482.3
1176.0	1516.9	840.9	1594.1	1319.8	1476.5
1151.1	1520.7	844.9	1593.0	1339.8	1470.9
1126.2	1526.4	854.9	1590.1	1359.7	1465.9
1101.3	1532.7	859.9	1589.4	1379.7	1461.1
1076.3	1539.6	874.9	1585.4	3-я серия	
1051.4	1542.2	879.9	1586.3	1193.9	1512.0
1026.4	1551.6	884.9	1584.6	1184.5	1513.8
1001.3	1559.3	889.9	1581.8	1175.0	1515.1
976.2	1561.7	894.9	1582.1	1165.0	1517.4
951.1	1567.0	899.9	1581.0	1150.1	1520.2
926.0	1575.4	904.9	1580.0	1130.2	1524.8
900.9	1584.2	909.9	1579.2	1100.3	1532.6
875.9	1583.8	920.0	1575.8	1035.4	1549.6
850.9	1593.6	930.0	1574.8	1020.4	1552.8
825.9	1596.0	940.0	1571.6	970.2	1564.4
780.4	1610.7	960.1	1567.2	869.9	1588.6
741.4	1615.8	985.2	1561.5	849.9	1591.6
720.9	1617.6	1000.3	1558.9	779.9	1609.9
700.9	1621.6	1047.9	1547.0	749.9	1613.0
676.0	1628.3	1064.9	1543.5	729.9	1615.9
651.0	1630.7	1080.3	1537.3	719.9	1618.2
625.0	1634.9	1120.2	1529.1	709.9	1619.5
611.8	1639.2	1140.1	1526.1	699.9	1622.5
601.0	1641.9	1160.0	1519.5	689.9	1624.9
591.0	1642.5	1170.0	1520.1	680.0	1626.0
581.0	1641.9	1180.0	1517.1	670.0	1628.9
571.0	1642.5	1190.0	1514.6	660.0	1629.1
561.0	1644.0	1199.0	1510.0	650.0	1631.5
551.1	1644.2	1204.9	1509.6	640.0	1632.3
547.0	1644.3	1209.9	1506.8	630.0	1634.5
545.5	1645.1	1214.9	1505.8	620.0	1638.1
Свинец-висмутовая эвтектика					
1-я серия		898.4	1654.7	1125.2	1595.1
702.9	1706.8	922.0	1650.4	2-я серия	
743.9	1696.4	945.6	1640.6	1052.4	1612.4
772.9	1690.5	976.2	1635.2	963.7	1639.5
797.9	1682.9	1001.3	1625.4	811.9	1672.1
825.9	1675.3	1024.4	1625.4	721.4	1697.0
848.4	1668.8	1050.9	1612.4	451.5	1757.8
873.9	1659.1	1074.3	1601.6	—	—

Таблица 3. Коэффициенты аппроксимирующего уравнения (4) и их средняя квадратическая погрешность

b_0	Δb_0	$-b_1$	Δb_1	$-b_2 \times 10^3$	$\Delta b_2 \times 10^3$
м/с		м/(с К)		м/(с К ²)	
Свинец					
1921.79	0.92	0.12464	0.00242	0.09531	0.00157
Висмут					
1717.48	0.50	0.08583	0.00107	0.07298	0.00055
Свинец-висмутовая эвтектика					
1837.07	2.62	0.14135	0.00732	0.06841	0.00376

тектике систематическое расхождение отсутствовало. Поэтому результаты различных серий экспериментов для висмута и свинец-висмутовой эвтектики принимались равноценными и им приписывалась одна и та же доверительная погрешность.

Затем весь массив опытных данных о скорости звука для каждого из исследованных металлических расплавов обрабатывался весовым МНК аппроксимирующим уравнением (4). Оптимальная степень этого уравнения определялась также с применением критерия Фишера. Коэффициенты аппроксимирующего уравнения и их средняя квадратическая погрешность, соответствующая 95%-ной доверительной вероятности, представлена в табл. 3.

На рис. 4 показаны отклонения экспериментальных данных о скорости звука в исследованных жидких металлах от рассчитанных по аппроксимирующему уравнению (4). Средняя квадратическая величина этих отклонений составляет

0.05, 0.1 и 0.15% для Pb, Bi и эвтектики системы Pb–Bi соответственно.

Отклонения результатов проведенных измерений скорости звука в расплавленных свинце, висмуте и свинец-висмутовой эвтектике от рекомендуемых справочных данных [10, 11] приведено на рис. 5. Как видно из рис. 5, расхождение между этими данными лежит в пределах $\pm 1\%$, что несколько превышает доверительную погрешность экспериментов настоящей работы.

Значения скорости звука в жидких Pb, Bi и сплаве системы Pb–Bi эвтектического состава в диапазоне от температуры плавления до 1300 К с шагом 50 К, рассчитанные по аппроксимирующему уравнению (4), представлены в табл. 4. В ней температура плавления (кристаллизации) свинца 600.61 К принята по МТШ-90, в которой она является реперной точкой, висмута 544.56 К – по данным Г.А. Хачкурузова (ГИПХ, г. Ленинград, 1988 г.) и свинец-висмутовой эвтектики 398.1 К – по [1].

На рис. 6 показано отклонение опытных данных настоящей работы о скорости звука в расплавленной свинец-висмутовой эвтектике от рассчитанных по интерполяционной формуле Кудрявцева [12], которая для двойного металлического сплава записывается в виде

$$a_{Pb-Bi}^2 = c_{Pb} a_{Pb}^2 + c_{Bi} a_{Bi}^2, \tag{5}$$

где a_{Pb} , a_{Bi} , a_{Pb-Bi} – скорость звука в жидких свинце, висмуте и свинец-висмутовой эвтектике соответственно; c_{Pb} , c_{Bi} – массовая доля свинца и висмута в эвтектическом сплаве системы Pb–Bi соответственно, причем $c_{Pb} + c_{Bi} = 1$. Скорость звука в расплавленных чистых Pb и Bi принималась по опытным данным настоящей работы. Из рис. 6 видно, что это отклонение имеет положительный

Таблица 4. Скорость звука в расплавленных исследованных металлах

T, К	a, м/с			T, К	a, м/с		
	Pb	Bi	Pb–Bi*		Pb	Bi	Pb–Bi*
398.1	–	–	1770.4	800	1761.1	1602.1	1680.6
400	–	–	1770.0	850	1747.0	1591.8	1667.9
450	–	–	1760.0	900	1732.4	1581.1	1654.8
500	–	–	1749.7	950	1717.4	1570.1	1641.4
544.56	–	1649.1	–	1000	1701.8	1558.7	1627.7
550	–	1648.2	1739.0	1050	–	1546.9	1613.6
600	–	1639.7	1728.0	1100	–	1534.8	1599.2
600.61	1812.5	–	–	1150	–	1522.3	1584.4
650	1800.5	1630.9	1716.7	1200	–	1509.4	1569.3
700	1787.8	1621.6	1705.0	1250	–	1496.2	–
750	1774.7	1612.1	1693.0	1300	–	1482.6	–

* Свинец-висмутовый сплав эвтектического состава.

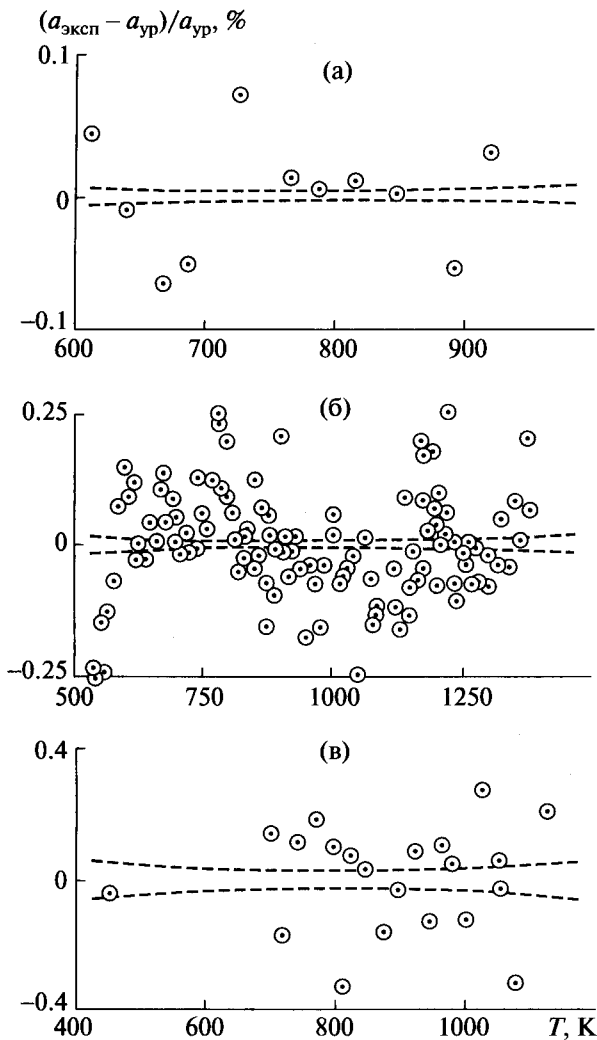


Рис. 4. Отклонение опытных данных настоящей работы о скорости звука в расплавленных металлах от рассчитанных по аппроксимирующему уравнению (4): (а) – свинец; (б) – висмут; (в) – свинец-висмутовая эвтектика. Всюду штриховыми линиями указаны границы коридора средней квадратической погрешности расчетных данных о плотности исследованных металлов с 95%-ной доверительной вероятностью.

знак, а по величине превышает аналогичное отклонение для плотности расплавленной свинец-висмутовой эвтектики [13].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены высокоточные и надежные измерения скорости звука в жидких свинце, висмуте и свинец-висмутовой эвтектике в интервале от температуры плавления до 1380 К. По результатам выполненных экспериментов были получены аппроксимирующие уравнения, а также рассчитаны таблицы скорости звука в этих металлах и сплаве в широком температурном диапазоне и оценена их доверительная погрешность.

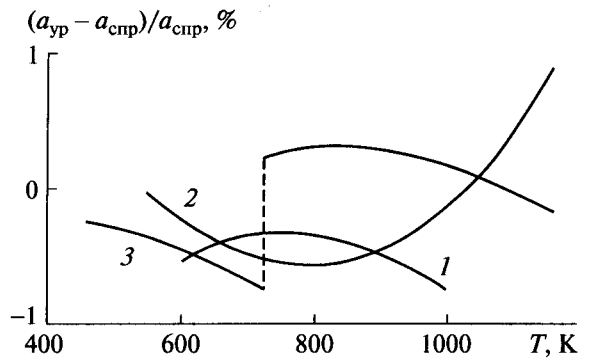


Рис. 5. Отклонение результатов настоящей работы о скорости звука в металлических расплавах от рекомендуемых справочных данных: 1 – свинец [9]; 2 – висмут [9]; 3 – свинец-висмутовая эвтектика [10].

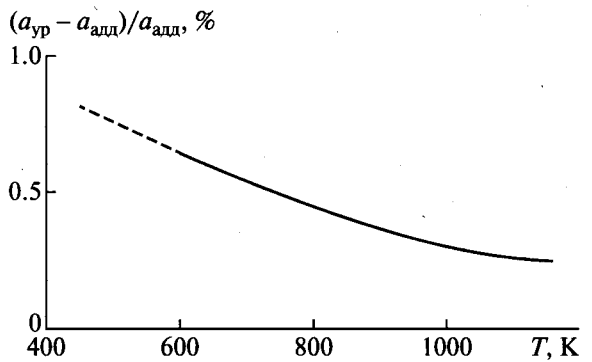


Рис. 6. Отклонение экспериментальных данных настоящей работы о скорости звука в жидкой эвтектике системы Pb–Bi от рассчитанных по формуле Кудрявцева (5).

Эти данные в определенной степени уточняют имеющиеся в литературе рекомендации и могут рассматриваться в качестве стандартных справочных данных для различных областей современной науки и новой техники.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты №№ 09-08-00040а и 07-08-00589а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Binary Alloy Phase Diagrams / Ed. Massalski T.B. V. 1. Metals Park, OH, USA: American Society for Metals, 1987. 1100 p.
2. Preston-Thomas H. The International Temperature Scale of 1990 (ITS-90) // Metrologia. 1990. V. 27. № 1. P. 3.
3. Кириллов П.Л., Терентьева М.И., Денискина Н.Б. Теплофизические свойства материалов ядерной техники / Под. ред. Кириллова П.Л. М.: ИздАТ, 2007. 280 с.
4. Handbook on Lead-Bismuth Eutectic Alloy and Lead Properties, Materials Compatibility, Thermal-Hydrau-

- lics and Technologies. Karlsruhe, Germany: Forschungszentrum Karlsruhe, 2007. 691 p.
5. Глазов В.М., Ким С.Г., Мамбетерзина Г.К. Аппаратура и методика для высокочастотных акустических исследований расслаивания жидкометаллических и полупроводниковых систем // Заводская лаборатория. 1991. Т. 57. № 8. С. 45.
 6. Ким Сен Гук. Молекулярная акустика жидких полуметаллов и полупроводников. Дисс. ... доктора химических наук. М.: ИОНХ РАН, 1991. 210 с.
 7. ГОСТ 8.207-76. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. М.: Изд-во стандартов, 1976. 10 с.
 8. Попов В.Н., Мозговой А.Г. Инструмент аппроксимации разнородных данных. М.: Интерконтакт Наука, 2006. 48 с.
 9. Худсон Д. Статистика для физиков. 2-е изд. дополн. Пер. с англ. М.: Мир, 1970. 296 с.
 10. Пашаев Б.П., Палчаев Д.К., Пащук Е.Г., Ревелис В.Г. Плотность, скорость ультразвука, электро- и теплопроводность легкоплавких многовалентных металлов в жидком состоянии // Обзоры по теплофизическим свойствам веществ. 1982. № 3. С. 1.
 11. Стремоусов В.И., Соломин Б.А. Скорость звука в тройной жидкометаллической системе Bi-Pb-Sn // ЖФХ. 1975. Т. 49. № 8. С. 1972.
 12. Кудрявцев Б.Б. О расчете скоростей звука в бинарных смесях. В сб.: Применение ультразвуки к исследованию вещества. Вып. 11 / Труды VII конференции по применению ультразвуки к исследованию вещества. М.: МОПИ, 1971. С. 63.
 13. Станкус С.В., Хайрулин Р.А., Мозговой А.Г. и др. Плотность жидкометаллического теплоносителя на основе свинец-висмутовой эвтектики при высоких температурах // ТВТ. 2006. Т. 44. № 2. С. 307.