

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ
РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ
ГОСУДАРСТВЕННАЯ СЛУЖБА
СТАНДАРТНЫХ СПРАВОЧНЫХ ДАННЫХ
(ГСССД)

УДК 532.14+536.412:669.45

ТАБЛИЦЫ СТАНДАРТНЫХ СПРАВОЧНЫХ ДАННЫХ

ПЛОТНОСТЬ И ТЕРМИЧЕСКОЕ РАСШИРЕНИЕ ЖИДКИХ
СПЛАВОВ СИСТЕМЫ НАТРИЙ–СВИНЕЦ В ДИАПАЗОНЕ
ТЕМПЕРАТУР ОТ ЛИНИИ ЛИКВИДУСА ДО 1000 К И В
ИНТЕРВАЛЕ КОНЦЕНТРАЦИЙ 2,5...21 ат. % Pb

ГСССД 305 – 2015

(ОКОНЧАТЕЛЬНАЯ РЕДАКЦИЯ, тема RU.3 040 — 2016)

РАЗРАБОТАНЫ ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ» с участием специалистов Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН (д-р физ.-мат. наук С.В. Станкус, д-р физ.-мат. наук Р.А. Хайрулин)

РЕКОМЕНДОВАНЫ к утверждению Федеральным государственным унитарным предприятием «Российский научно-технический центр информации по стандартизации, метрологии и оценке соответствия» (ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ»)

ОДОБРЕНЫ экспертной комиссией в составе:

докт. техн. наук В.В. Рощупкина,
докт. физ.-мат. наук В.Г. Мартынеца,
канд. физ.-мат. наук А.Г. Капительного,
канд. техн. наук П.В. Попова

ПОДГОТОВЛЕНЫ к утверждению Российским научно-техническим центром информации по стандартизации, метрологии и оценке соответствия (ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ»)

УТВЕРЖДЕНЫ Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии **«27» октября 2015 г.**
(протокол № 3)

ГОСУДАРСТВЕННАЯ СЛУЖБА
СТАНДАРТНЫХ СПРАВОЧНЫХ ДАННЫХ

Таблицы стандартных справочных данных

Плотность и термическое расширение
жидких сплавов системы натрий–свинец в
диапазоне температур от линии ликвидуса
до 1000 К и в интервале концентраций
2,5...21 ат. % Pb

ГСССД
305 – 2015

Tables of Standard Reference Data

The Density and Thermal Expansion of Liquid
Alloys of the Sodium–Lead System over the
Temperature Range from Liquidus Line to
1000 K and in the Concentration Interval of
2.5...21 at. % Pb

GSSSD
305 – 2015

ДЕПОНИРОВАННАЯ РУКОПИСЬ

УДК 532.14+536.412:669.45

Таблицы стандартных справочных данных ГСССД 305 – 2015.

Плотность и термическое расширение жидких сплавов системы натрий–свинец в диапазоне температур от линии ликвидуса до 1000 К и в интервале концентраций 2,5...21 ат. % Pb / С.В. Станкус, Р.А. Хайрулин. Росс. научно-техн. центр информации по стандартизации, метрологии и оценке соответствия ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ» – М., 2015. – 22 с. Ил. 2. Библиогр. 15 назв. Рус. 10 назв.

Депонированы в ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ» 27.10.2015 г, № 885-2015 кк.

Приведены стандартные справочные данные о плотности и объемном коэффициенте термического расширения сплавов натрий – свинец с содержанием 2,5; 5; 7,5; 10 и 21 ат. % Pb в жидком состоянии для интервала температур от линии ликвидуса до 1000 К.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВОДНАЯ ЧАСТЬ	6
МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ	8
ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ	10
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	20
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	21

ВВОДНАЯ ЧАСТЬ

В соответствии с новой технологической платформой атомной энергетики России в первой половине XXI века были разработаны Федеральные целевые программы (ФЦП) по ядерным энергетическим технологиям нового поколения и ядерным космическим технологиям, в основе которых лежат планы по проектированию и строительству ядерных реакторов на быстрых нейтронах с жидкометаллическими теплоносителями. Новые ядерные технологии предполагают использовать щелочные и тяжелые металлы и их сплавы в качестве перспективных теплоносителей для быстрых реакторов. Это, естественно, определяет характер и целесообразность экспериментальных и расчетно-теоретических исследований теплофизических свойств перспективных жидкометаллических теплоносителей, в частности, термических свойств щелочных металлов и их сплавов, в конденсированной и паровой фазах при технически важных температурах и давлениях.

Расплавы натрия–свинец с концентрацией до 10 ат. % Pb рассматриваются как перспективные теплоносители для ядерных реакторов на быстрых нейтронах [1, 2]. Эти сплавы более пожаробезопасны по сравнению с чистым натрием. Авторы [2] установили, что расплавы, содержащие 10 ат. % Pb, не возгораются на воздухе при температурах до 700°C, а сплавы с меньшим содержанием свинца перестают гореть при достижении этой концентрации. Однако многие термодинамические и кинетические свойства жидкой системы Na–Pb практически никак не отражены в справочной научно-технической литературе, что затрудняет анализ перспектив использования этих расплавов в качестве охлаждающих жидкостей. В частности термические свойства расплавов, богатых натрием, ранее экспериментально исследовались только в двух работах [3, 4]. В работе [3] были исследованы жидкие сплавы, содержащие 5, 10 и 20 ат. % Pb, а в работе [4] – расплавы с содержанием 1,9 и 4 ат. % Pb. Результаты этих исследований по плотности жидкостей вблизи ликвидуса согласуются в пределах 1 %, однако, расхождения по коэффициентам теплового расширения достигают 28 %. Между тем, надежные данные по

тепловому расширению теплоносителей необходимы для проведения теплогидравлического моделирования работы реакторов, а также для прогнозирования последствий аварийных ситуаций, при которых отвод тепла из активной зоны происходит только за счет естественной конвекции теплоносителя.

В связи с вышесказанным экспериментальные исследования плотности и термического расширения жидких сплавов натрия–свинец представляют большой практический интерес. Такого рода измерения были выполнены в Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН [5, 6] для составов 2,5; 5; 7,5; 10 и 21 ат. % Pb. На основании анализа и обобщения полученных результатов разработаны стандартные справочные данные по плотности и объемным коэффициентам термического расширения (КТР) исследованных материалов в диапазоне температур от линии ликвидуса до 1000 К.

МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Для приготовления образцов сплавов применялись свинец металлический марки С00 по ГОСТ 3778–98 и натрий металлический реакторной чистоты по ОСТ 95 10582–2003. Химический состав металлов по паспортам предприятий–изготовителей приведен в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Химический состав свинца

Содержание примесей не более, масс. %									Содержание основного металла, масс. %
Ag	Cu	As	Sb	Sn	Zn	Re	Bi	Ca, Na, Mg в сумме	
0,00081	0,0005	0,0002	0,0002	0,0001	0,0005	0,0010	0,0052	0,0002	не менее 99,99

Таблица 2

Химический состав натрия

Содержание примесей не более, масс. %											Содержание основного металла, масс. %
K	Ca	C	Cl	N	Fe	Si	Bi	Ba	Sn	O	
0,1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,001	не менее 99,7
	1	3	3	1	5	1	1	1	2		

Измерительные ячейки для образцов изготавливались из нержавеющей стали 12Х18Н10Т. Ячейка состояла из цилиндрического тигля высотой 60 мм, внутренним диаметром 50 мм и крышки с тонкостенной гильзой для термопары. Свинец первоначально переплавлялся в атмосфере чистого аргона (99,992 об. %). После этого поверхность слитков очищалась от пленок окислов. Натрий подвергался дополнительной очистке методом дистилляции в вакууме. Массы навесок натрия и свинца (20–120 г), необходимые для расчета состава сплавов, измерялись на аналитических весах с точностью до 2–3 мг,

погрешность определения концентрации сплава не превышала 0,01 ат. %. Составной образец помещался в тигель. Все эти операции проводились в атмосфере аргона. Затем тигель эвакуировался и герметизировался.

Термические свойства жидких сплавов натрий–свинец исследовались методом просвечивания образцов узким пучком гамма-излучения (гамма-метод) [7-9] по методике ГСССД МЭ 206–2013 [10]. Эксперименты проводились на гамма-плотномере П-3 ИТ СО РАН [7]. Плотность расплава ρ рассчитывается по формуле:

$$\rho(T) = \frac{\ln[J_0(T)/J(T)]}{\mu d(T)},$$

которая вытекает из экспоненциального закона ослабления гамма-излучения. Здесь T – температура, К; $J_0(T)$ и $J(T)$ – интенсивности пучка излучения, прошедшего через пустую и заполненную (с образцом) измерительную ячейку соответственно, с^{-1} ; $d(T)$ – длина ослабления излучения (внутренний диаметр тигля с поправкой на конечный диаметр пучка), м; μ – массовый коэффициент ослабления излучения для исследуемого материала (для сплавов он рассчитывается из массовых коэффициентов ослабления излучения для компонентов с помощью правила аддитивности), $\text{м}^2/\text{кг}$. Температура измерялась хромель–алюмелевыми термопарами градуировки К по ГОСТ Р 8.585–2001 [11]. Термопары поверялись по реперным точкам МТШ–90 – температурам плавления (затвердевания) чистых натрия, олова и сурьмы. При этом воспроизводимость показаний поверенных термопар была значительно лучше, чем пределы допустимых отклонений их термоЭДС, нормированные государственным стандартом [11], а погрешность измерения температуры ими оценивалась равной 0,3–1,0 К. Массовые коэффициенты ослабления излучения компонентов измерялись на специально изготовленных для этой цели твердых образцах с хорошо известными размерами.

Процесс измерений плотности жидких сплавов натрий–свинец проводился, как кратко описано ниже. Ячейка устанавливалась в печь гамма-плотномера. Печь эвакуировалась и заполнялась аргоном до давления 0,1 МПа.

Образец плавился, нагревался до 950 К и выдерживался при этой температуре несколько часов с целью гомогенизации. Гомогенность расплава контролировалась по измерениям коэффициента ослабления гамма-излучения в образце на различных высотах. При необходимости проводилось дополнительное перемешивание расплава путем встряхивания ячейки. Затем в ходе охладений и нагревов определялась температурная зависимость плотности жидкого сплава. Скорость нагрева–охлаждения составляла 2–3 К/мин.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Экспериментальные данные настоящей работы по плотности жидких сплавов натрий–свинец приведены в табл. 3–7. Их доверительная погрешность, объединяющая систематическую и случайную составляющие, рассчитывалась по методике [12–14] с учетом рекомендаций [15]. Согласно оценкам, она не превышала 0,2 % вблизи температуры ликвидуса и 0,4 % при максимальной температуре измерений. Эти оценки были подтверждены сопоставлением экспериментальных результатов для жидкого натрия с литературными данными [6].

Таблица 3

Экспериментальные данные по плотности жидкого сплава натрий–свинец с содержанием 2,50 ат. % Pb

T, K	$\rho, \text{кг/м}^3$	T, K	$\rho, \text{кг/м}^3$	T, K	$\rho, \text{кг/м}^3$	T, K	$\rho, \text{кг/м}^3$
Серия 1		768,5	1025,1	601,2	1071,0	866,6	1000,3
919,7	984,4	763,3	1027,5	596,5	1073,0	763,5	1023,9
919,8	985,5	758,1	1031,2	591,8	1076,1	763,4	1026,5
919,8	986,6	752,9	1032,1	587,2	1077,2	763,5	1026,6
919,8	987,7	747,7	1030,6	582,8	1079,9	763,5	1025,2
919,8	986,0	742,6	1030,9	578,4	1078,2	763,5	1027,2
919,8	984,7	737,6	1034,4	574,1	1078,7	652,5	1055,9
919,8	984,3	732,5	1037,8	569,9	1082,1	652,2	1053,3
919,4	987,1	763,3	1027,5	565,8	1080,8	652,1	1056,1
917,8	985,5	758,1	1031,2	561,7	1082,5	652,0	1053,7
914,9	986,4	752,9	1032,1	557,8	1083,4	651,9	1057,0
910,9	987,3	747,7	1030,6	553,9	1081,9	527,2	1090,0
906,4	990,4	742,6	1030,9	550,2	1085,7	527,1	1088,7
901,6	992,3	737,6	1034,4	546,5	1087,2	527,1	1091,2

T, K	$\rho, \text{кг/м}^3$	T, K	$\rho, \text{кг/м}^3$	T, K	$\rho, \text{кг/м}^3$	T, K	$\rho, \text{кг/м}^3$
896,5	993,2	732,5	1037,8	542,9	1087,5	527,1	1092,1
891,3	994,9	727,4	1036,4	539,3	1088,5	527,1	1087,0
886,0	995,1	722,3	1037,1	535,8	1087,3		
880,9	996,3	717,2	1040,5	532,4	1090,3		
875,7	998,3	712,1	1041,8	529,0	1091,7		
870,6	997,8	707,0	1042,7	525,7	1091,3		
865,5	999,2	701,9	1043,4	522,5	1093,8		
860,4	1003,2	696,7	1044,6	519,3	1094,8		
855,4	1001,8	691,5	1046,6	516,2	1094,8		
850,2	1004,9	686,4	1046,9	513,2	1094,8		
845,2	1004,9	681,2	1051,1	510,2	1097,7		
840,1	1007,7	676,1	1051,5	507,3	1098,3		
835,0	1008,7	670,9	1052,4	504,4	1097,8		
829,9	1009,7	665,6	1055,5	Серия 2			
824,6	1012,1	660,2	1055,5	969,6	973,5		
819,4	1014,8	654,6	1056,9	969,6	975,7		
814,3	1014,3	649,0	1061,2	969,6	974,4		
809,2	1019,1	643,3	1060,9	969,6	969,8		
804,1	1015,6	637,8	1059,6	969,6	970,4		
799,0	1020,5	632,2	1061,0	969,6	971,3		
793,9	1017,3	626,8	1064,5	866,9	997,9		
788,8	1024,3	621,5	1064,8	866,6	998,6		
783,7	1021,6	616,2	1068,9	866,5	996,2		
778,7	1023,3	611,1	1068,0	866,5	999,1		
773,6	1023,6	606,1	1073,1	866,6	997,2		

Таблица 4

Экспериментальные данные по плотности жидкого сплава натрий–свинец с содержанием 5,00 ат. % Pb

T, K	$\rho, \text{кг/м}^3$	T, K	$\rho, \text{кг/м}^3$	T, K	$\rho, \text{кг/м}^3$	T, K	$\rho, \text{кг/м}^3$
Серия 1		849,8	1201,7	720,4	1242,1	597,7	1280,9
933,5	1178,1	844,7	1204,2	715,3	1245,4	594,4	1281,0
933,5	1178,3	839,6	1204,0	710,1	1245,6	592,2	1283,4
933,5	1176,0	834,5	1206,9	705,0	1249,3	591,1	1283,1
933,5	1176,2	829,3	1209,2	699,8	1251,8	590,6	1284,4
933,5	1179,8	824,0	1210,0	694,6	1249,9	590,3	1283,3
933,5	1178,0	818,7	1212,2	689,3	1252,3	590,1	1284,6
933,5	1178,4	813,5	1214,0	684,1	1250,9	589,9	1285,4
932,9	1176,4	808,4	1215,2	678,9	1255,8	589,2	1283,1
930,8	1180,1	803,2	1215,4	673,7	1256,7	587,5	1287,8
927,0	1180,6	798,1	1219,7	668,4	1260,4	585,0	1286,9
922,4	1178,9	792,9	1222,4	663,1	1262,0	581,9	1287,3
917,5	1184,2	787,7	1221,5	657,9	1264,8	578,4	1286,7

T, K	$\rho, \text{кг/м}^3$	T, K	$\rho, \text{кг/м}^3$	T, K	$\rho, \text{кг/м}^3$	T, K	$\rho, \text{кг/м}^3$
912,3	1185,9	782,6	1226,2	652,6	1266,1	574,6	1287,7
907,2	1188,1	777,5	1227,1	647,4	1265,1	570,8	1288,7
902,0	1186,2	772,4	1229,9	642,2	1269,4	566,9	1291,1
896,8	1188,9	767,3	1228,6	637,0	1268,7	563,0	1293,9
891,4	1190,9	762,0	1230,7	631,8	1270,3	559,1	1296,6
886,1	1190,9	756,7	1234,7	626,5	1272,5	555,2	1294,8
880,9	1192,1	751,4	1233,5	621,2	1275,2	551,4	1296,1
875,7	1192,9	746,2	1235,5	616,0	1275,8	547,6	1296,9
870,6	1197,7	741,1	1235,9	611,6	1277,7		
865,4	1197,5	736,0	1240,0	608,3	1279,3		
860,2	1198,9	730,8	1239,4	605,1	1276,7		
855,0	1199,6	725,6	1240,4	601,5	1282,7		

Таблица 5

Экспериментальные данные по плотности жидкого сплава натрий–свинец с содержанием 7,50 ат. % Pb

T, K	$\rho, \text{кг/м}^3$	T, K	$\rho, \text{кг/м}^3$	T, K	$\rho, \text{кг/м}^3$	T, K	$\rho, \text{кг/м}^3$
Серия 1		866,3	1404,7	777,5	1435,7	668,6	1474,5
952,9	1374,6	861,1	1409,8	777,5	1436,2	663,3	1478,1
952,9	1374,8	856,0	1410,9	776,9	1437,0	658,0	1483,9
952,9	1374,4	850,7	1410,7	775,6	1438,0	652,8	1483,0
952,9	1372,4	845,4	1413,8	773,4	1439,4	647,6	1485,5
952,9	1373,6	840,2	1415,5	770,1	1442,4	642,4	1490,2
952,9	1374,0	835,0	1417,0	765,8	1441,2	637,2	1489,2
952,5	1376,1	829,9	1418,6	760,9	1444,5	631,9	1491,4
950,8	1377,8	824,7	1421,5	756,0	1445,5	626,7	1493,1
947,6	1376,9	819,6	1423,7	751,0	1446,0	621,5	1495,9
943,4	1376,1	814,4	1423,2	746,0	1447,2	616,3	1496,5
938,7	1380,5	809,2	1425,3	740,9	1451,5	611,2	1497,9
933,7	1386,1	804,0	1429,5	735,8	1451,7	606,2	1501,3
928,7	1384,7	798,8	1432,1	730,6	1455,6	601,3	1501,8
923,5	1384,7	793,7	1434,4	725,4	1457,0	596,4	1502,0
918,3	1387,6	788,7	1432,8	720,2	1455,1	591,7	1506,1
912,9	1390,7	784,4	1436,1	715,1	1458,9	587,1	1508,4
907,7	1388,7	781,5	1436,7	710,0	1464,7	582,6	1509,5
902,5	1392,3	779,7	1436,0	704,9	1463,7	578,2	1512,5
897,4	1396,7	778,7	1434,5	699,8	1464,8	573,9	1512,1
892,2	1395,5	778,1	1435,9	694,6	1469,3	569,6	1513,8
887,0	1396,6	777,8	1436,5	689,4	1469,7		
881,8	1399,2	777,6	1435,6	684,3	1471,7		
876,6	1401,0	777,6	1434,9	679,1	1473,7		
871,4	1403,5	777,5	1439,4	673,9	1475,7		

Таблица 6

Экспериментальные данные по плотности жидкого сплава натрий–свинец с
содержанием 9,99 ат. % Pb

T, K	$\rho, \text{кг/м}^3$	T, K	$\rho, \text{кг/м}^3$	T, K	$\rho, \text{кг/м}^3$	T, K	$\rho, \text{кг/м}^3$
Серия 1		877,8	1613,9	758,5	1663,8	682,4	1695,8
956,3	1585,1	872,5	1618,4	753,4	1668,9	681,9	1697,4
956,3	1584,4	867,3	1622,2	748,2	1668,3	680,3	1697,8
956,3	1583,6	862,2	1620,6	743,0	1670,5	677,3	1699,3
956,3	1586,7	857,1	1622,0	737,9	1673,2	673,3	1702,6
956,3	1584,4	851,9	1627,3	732,7	1676,2	668,7	1704,3
956,3	1584,3	846,7	1627,6	727,6	1677,2	664,0	1705,9
955,6	1585,0	841,4	1631,4	722,5	1681,7	659,0	1705,0
953,3	1584,8	836,1	1632,0	717,3	1683,3	653,9	1708,1
949,7	1587,9	830,9	1636,0	712,1	1684,9	648,7	1712,7
945,1	1590,0	825,8	1637,8	706,9	1686,2	643,4	1713,2
940,2	1593,1	820,7	1637,6	701,7	1688,4	638,1	1716,8
935,1	1593,3	815,5	1642,2	696,6	1690,3	632,9	1716,6
929,9	1594,6	810,3	1641,6	691,9	1692,9	627,7	1718,5
924,7	1600,4	805,1	1647,5	688,3	1694,2	622,4	1721,8
919,6	1600,3	800,0	1649,5	685,9	1693,4	617,2	1723,4
914,3	1599,8	794,8	1647,8	684,5	1695,4	612,1	1729,9
909,0	1602,2	789,8	1651,9	683,7	1696,7	607,1	1728,8
903,7	1607,2	784,6	1655,7	683,2	1696,5	602,1	1732,1
898,4	1609,5	779,3	1658,1	682,8	1696,8	597,2	1733,3
893,3	1607,4	774,0	1660,0	682,6	1695,2		
888,1	1613,9	768,8	1662,6	682,5	1695,6		
883,0	1614,9	763,6	1667,1	682,4	1699,7		

Таблица 7

Экспериментальные данные по плотности жидкого сплава натрий–свинец с
содержанием 21,03 ат. % Pb

T, K	$\rho, \text{кг/м}^3$	T, K	$\rho, \text{кг/м}^3$	T, K	$\rho, \text{кг/м}^3$	T, K	$\rho, \text{кг/м}^3$
Серия 1		870,4	2692,4	796,7	2748,9	692,8	2835,6
951,5	2630,2	866,7	2695,3	793,3	2752,2	690,1	2835,1
951,5	2633,0	863,1	2698,7	789,8	2755,5	688,2	2839,0
951,5	2632,4	859,5	2699,7	786,3	2761,1	687,1	2840,1
951,5	2631,4	855,9	2701,8	782,7	2760,9	686,3	2840,4
951,5	2628,8	852,3	2708,0	779,0	2759,5	685,8	2841,1
950,8	2631,6	848,7	2708,5	775,4	2765,3	685,5	2844,1
949,0	2632,1	845,1	2709,9	771,8	2773,1	685,3	2840,6
946,3	2636,7	841,4	2713,7	768,2	2771,6	685,2	2843,5
943,0	2639,0	837,8	2715,0	764,6	2774,3	685,1	2842,4
939,5	2639,7	834,3	2721,6	761,0	2779,2	685,2	2844,5
935,9	2642,7	830,7	2719,7	757,4	2783,1	685,2	2840,4
932,2	2644,6	827,0	2725,1	753,8	2781,9	684,7	2843,0
928,6	2649,6	823,4	2728,1	750,2	2787,4	683,3	2843,3

T, K	$\rho, \text{кг/м}^3$	T, K	$\rho, \text{кг/м}^3$	T, K	$\rho, \text{кг/м}^3$	T, K	$\rho, \text{кг/м}^3$
925,0	2652,9	819,8	2728,8	746,7	2787,2	681,1	2848,0
921,4	2652,9	816,2	2733,0	743,1	2789,9	678,4	2848,6
917,6	2658,8	813,3	2737,5	739,5	2800,7	675,3	2850,3
913,9	2658,3	811,4	2737,1	735,9	2801,0	672,1	2856,8
910,3	2661,7	810,3	2740,1	732,2	2800,4	668,8	2858,2
906,6	2664,6	809,7	2735,7	728,6	2802,8	665,4	2860,3
903,0	2668,4	809,3	2741,5	724,9	2809,8	662,0	2864,4
899,4	2669,2	809,1	2737,4	721,3	2810,5	658,5	2869,2
895,8	2673,1	809,0	2737,3	717,8	2815,5	654,9	2867,9
892,2	2672,9	809,0	2741,2	714,2	2818,9	651,3	2872,5
888,6	2680,3	808,8	2737,1	710,6	2823,7		
885,0	2678,1	807,8	2739,2	707,0	2822,1		
881,4	2683,9	805,8	2741,0	703,4	2826,6		
877,8	2687,6	803,2	2747,1	699,9	2827,5		
874,1	2690,8	800,1	2749,4	696,3	2830,3		

Полученные опытные данные по плотности жидких сплавов обрабатывались методом наименьших квадратов. В качестве аппроксимирующего уравнения выбирался полином вида

$$\rho(T) = \rho(T_L) + a_1(T - T_L) + a_2(T - T_L)^2 + \dots, \quad (1)$$

где T_L – температура ликвидуса [5, 6]. Оптимальная степень полинома (1) определялась путем регрессионно-статистического анализа результатов этой обработки с использованием критерия Фишера [13, 14]. Найденные таким образом коэффициенты уравнения (1) для плотности исследованных расплавов натрия–свинец представлены в табл. 8.

Таблица. 8

Коэффициенты аппроксимирующих уравнений (1) для плотности жидких сплавов Na–Pb.

Состав, ат. % Pb	T_L , К	$\rho(T_L)$, кг·м ⁻³	a_1 , кг·м ⁻³ ·К ⁻¹	a_2 , 10 ⁻⁴ кг·м ⁻³ ·К ⁻²
2,50	502,5	1 098,4	– 0,270	0
5,00	547,0	1 297,4	– 0,311	0
7,50	571,9	1 512,5	– 0,363	0
9,99	594,9	1 733,1	– 0,412	0
21,03	659,5	2 865,1	– 0,885	2,945

В качестве примера на рис. 1, 2 приведены отклонения опытных данных настоящей работы по плотности жидких сплавов натрия–свинец с содержанием 7,50 и 21,03 ат. % Pb от значений, рассчитанных по аппроксимирующему уравнению (1). Среднее квадратическое значение этих отклонений не превышало 0,1 %.

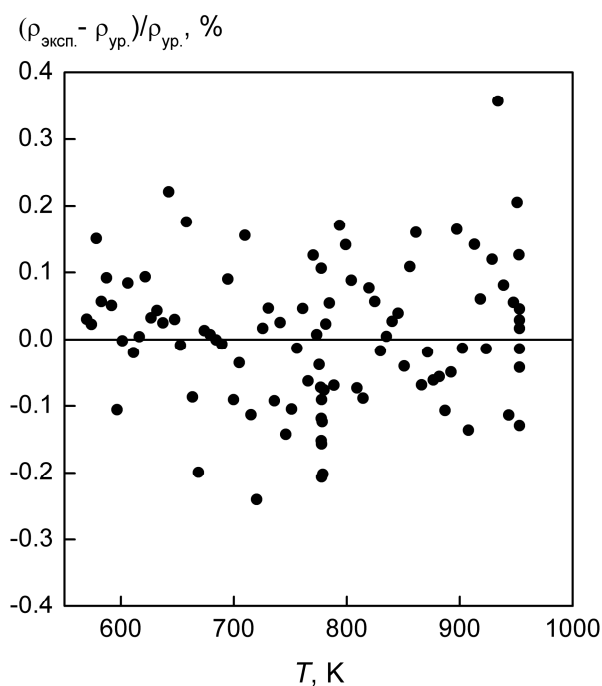


Рис. 1. Отклонение опытных данных настоящей работы по плотности жидкого сплава натрия–свинец с содержанием 7,50 ат. % Pb от значений, рассчитанных по аппроксимирующему уравнению (1).

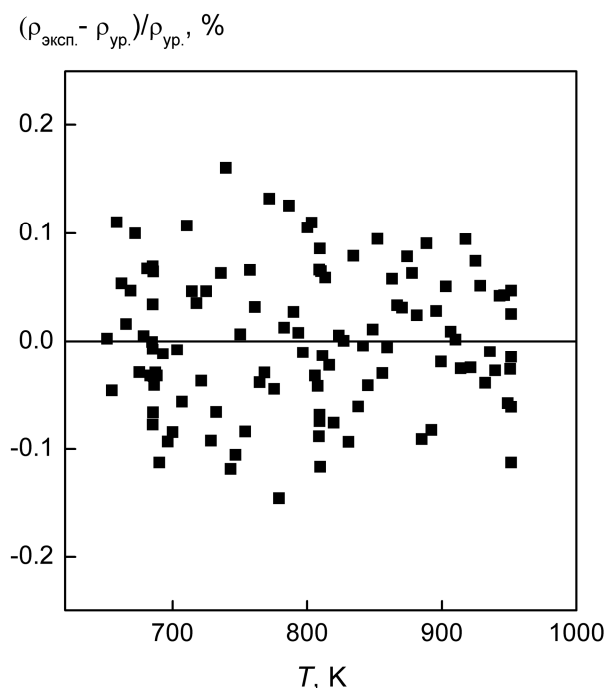


Рис. 2. Отклонение опытных данных настоящей работы по плотности жидкого сплава натрий–свинец с содержанием 21,03 ат. % Pb от значений, рассчитанных по аппроксимирующему уравнению (1).

Объемный коэффициент термического расширения жидких сплавов натрий–свинец рассчитывался по опытным данным настоящей работы об их плотности по следующей формуле:

$$\beta = -(1/\rho)(d\rho/dT), \quad (2)$$

где $d\rho/dT$ – первая производная от температурной зависимости плотности расплавов, представленной в виде аппроксимирующих уравнений (1), коэффициенты которых представлены в табл. 8.

Значения плотности и объемного коэффициента термического расширения (вместе с доверительными погрешностями) жидких сплавов натрий–свинец, рассчитанные по (1, 2) в диапазоне температур от ликвидуса до

1000 К, представлены в табл. 9–13. Погрешности приведены для доверительной вероятности 95 %.

Таблица 9

Стандартные справочные данные по плотности и объемному коэффициенту термического расширения жидкого сплава натрий–свинец с содержанием 2,50 ат. % Pb

T, K	$\rho, \text{кг/м}^3$	$\beta, 10^{-5} K^{-1}$	Погрешность, %	
			ρ	β
502,5	1098,4	24,6	0,2	2
550	1085,6	24,9	0,2	2
600	1072,1	25,2	0,2	2
650	1058,6	25,5	0,2	2
700	1045,1	25,8	0,3	2
750	1031,6	26,2	0,3	2
800	1018,1	26,5	0,3	2
850	1004,6	26,9	0,3	2
900	991,1	27,2	0,4	2
950	977,6	27,6	0,4	2
1000	964,1	28,0	0,4	2

Таблица 10

Стандартные справочные данные по плотности и объемному коэффициенту термического расширения жидкого сплава натрий–свинец с содержанием 5,00 ат. % Pb

T, K	$\rho, \text{кг/м}^3$	$\beta, 10^{-5} K^{-1}$	Погрешность, %	
			ρ	β
547,0	1297,4	24,0	0,2	2
600	1281,0	24,3	0,2	2
650	1265,4	24,6	0,2	2
700	1249,8	24,9	0,2	2
750	1234,3	25,2	0,3	2
800	1218,7	25,5	0,3	2
850	1203,2	25,9	0,3	2
900	1187,6	26,2	0,3	2
950	1172,0	26,5	0,4	2
1000	1156,5	26,9	0,4	2

Таблица 11

Стандартные справочные данные по плотности и объемному коэффициенту термического расширения жидкого сплава натрий–свинец с содержанием 7,50 ат. % Pb

T, K	$\rho, \text{кг/м}^3$	$\beta, 10^{-5} K^{-1}$	Погрешность, %	
			ρ	β
571,9	1512,5	24,0	0,2	2
600	1502,3	24,1	0,2	2
650	1484,2	24,4	0,2	2
700	1466,0	24,7	0,2	2
750	1447,9	25,1	0,2	2
800	1429,8	25,4	0,3	2
850	1411,6	25,7	0,3	2
900	1393,5	26,0	0,3	2
950	1375,4	26,4	0,3	2
1000	1357,2	26,7	0,4	2

Таблица 12

Стандартные справочные данные по плотности и объемному коэффициенту термического расширения жидкого сплава натрий–свинец с содержанием 9,99 ат. % Pb

T, K	$\rho, \text{кг/м}^3$	$\beta, 10^{-5} K^{-1}$	Погрешность, %	
			ρ	β
594,9	1733,1	23,8	0,2	2
650	1710,4	24,1	0,2	2
700	1689,8	24,4	0,2	2
750	1669,2	24,7	0,2	2
800	1648,6	25,0	0,3	2
850	1628,0	25,3	0,3	2
900	1607,3	25,6	0,3	2
950	1586,7	26,0	0,3	2
1000	1566,1	26,3	0,4	2

Таблица 13

Стандартные справочные данные по плотности и объемному коэффициенту
термического расширения жидкого сплава натрий–свинец с содержанием 21,03
ат. % Pb

T, K	$\rho, \text{кг/м}^3$	$\beta, 10^{-5} K^{-1}$	Погрешность, %	
			ρ	β
659,5	2865,1	30,9	0,2	3
700	2829,7	30,4	0,2	3
750	2787,4	29,8	0,2	2
800	2746,6	29,2	0,3	2
850	2707,2	28,5	0,3	2
900	2669,3	27,8	0,3	3
950	2632,9	27,1	0,3	4
1000	2598,0	26,3	0,4	5

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Усовершенствованным методом проникающего гамма-излучения проведены новые высокоточные измерения плотности жидких сплавов натрия–свинец с содержанием 2,5; 5; 7,5; 10 и 21 ат. % Pb в интервалах температур от линии ликвидуса до 950...1000 К. Исследования выполнены по методике ГСССД МЭ 206–2013. Полученные результаты существенно уточняют имеющиеся литературные данные по плотности расплавов Na–Pb. Плотность составов с содержанием 2,5; 7,5 и 21 ат. % Pb исследована впервые.

Рассчитаны таблицы температурных зависимостей плотности и коэффициента объемного термического расширения сплавов натрия–свинец с содержанием 2,5 ат. % Pb; 5 ат. % Pb; 7,5 ат. % Pb; 10 ат. % Pb и 21 ат. % Pb в жидком состоянии, для интервала температур от ликвидуса до 1000 К.

Разработанные стандартные справочные данные о плотности и КТР сплавов натрия–свинец в жидкой фазе найдут широкое применение в различных областях современной науки и новой техники, в первую очередь, в атомной и термоядерной энергетике.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Субботин В.И., Арнольдов М.Н., Козлов В.А., Шимкевич А.Л. Жидкометаллические теплоносители для ядерной энергетики // Атомная энергия. 2002. Т. 92. № 1. С. 31.
2. Efanov A.D., Loginov N.I., Morozov V.A., et al. Investigation of Thermodynamic Properties of Sodium–Lead System // J. Phys.: Conf. Ser. 2008. Vol. 98. Paper No. 032013.
3. Ruppertsberg H., Jost J. Determination of the Heat Capacity of Liquid Alloys According to the $(\partial p / \partial T)_S$ Procedure: Pb/Na // Thermochim. Acta. 1989. Vol. 151. P. 187–195.
4. McAlister S.P. The Compressibility of Liquid Sodium Alloys // Philos. Mag. 1972. Vol. 26. P. 853–863.
5. Khairulin R.A., Stankus S.V., Abdullaev R.N., Mozgovoi A.G. The density and the binary diffusion coefficients of liquid Na–Pb alloys with a low content of lead // Proceedings of the 9th Asian Thermophysical Properties Conference, Beijing, China, October 19–22, 2010. – Beijing, 2010. – Paper Number: 109037 – 4 p. (CD-ROM).
6. Хайрулин Р.А., Станкус С.В., Абдуллаев Р.Н. Плотность и тепловое расширение жидких сплавов системы Na–Pb с малым содержанием свинца // Теплофизика и аэромеханика. 2013. Т. 20. № 2. С. 225–228.
7. Хайрулин Р.А., Станкус С.В., Кошелева А.С. Взаимная диффузия в расплавах системы олово–свинец эвтектического и околоэвтектического составов // Теплофизика высоких температур. 2008. Т. 46. № 2. С. 239–245.
8. Станкус С.В., Хайрулин Р.А. Измерение термических свойств платины в интервале температур 293–2300 К методом проникающего излучения // Теплофизика высоких температур. 1992. Т. 30. № 3. С. 487–494.

9. Stankus S.V., Tyagel'sky P.V. Thermal Properties of Al_2O_3 in the Melting Region // Int. J. Thermophys. 1994. Vol. 15. P. 309–316.
10. Станкус С.В., Хайрулин Р.А., Попель П.С. Методика экспериментального определения плотности твердых и жидких материалов гамма-методом / Методика ГСССД МЭ 206–2013. Российский научно–технический центр информации по стандартизации, метрологии и оценке соответствия. М.: Стандартиформ, 2013. 54 с. Деп. в ФГУП “СТАНДАРТИНФОРМ» 20.03.2013 г., № 903а – 2013 кк.
11. ГОСТ 8.585–2001. Термопары. Номинальные статистические характеристики преобразования. М.: Изд-во стандартов, 2002. 78 с.
12. Басин А.С., Багинский А.В., Колотов Я.Л., Станкус С.В. Высокотемпературный гамма-плотномер и дилатометр. В сб.: Гамма-метод в металлургическом эксперименте. Новосибирск: Институт теплофизики СО АН СССР, 1981. С. 11–22.
13. ГОСТ 8.207–76. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. М.: Изд-во стандартов, 1976. 10 с.
14. Худсон Д. Статистика для физиков. Лекции по теории вероятности и элементарной статистике. Пер. с англ., 2-е дополн. изд. М.: Мир, 1970. 294 с.
15. Станкус С.В., Хайрулин Р.А., Мозговой А.Г., Рошупкин В.В., Покрасин М.А. Экспериментальное исследование плотности висмута в конденсированном состоянии в широком интервале температур // // Теплофизика высоких температур. 2005. Т. 43. № 3. С. 374–384.