

СОТНОШЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА ТРАНСПОРТНЫХ И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЭВТЕКТИКИ СВИНЕЦ-ВИСМУТ

И.А. Чусов*, **, В.Г. Проняев*, Г.Е. Новиков***, Н.А. Обысов***

* ИАТЭ НИЯУ МИФИ

249035, Калужская обл., г. Обнинск, Студгородок, 1

** ФГУП ОКБ «Гидропресс»

142103, Московская обл., г. Подольск, ул. Орджоникидзе, 21

*** Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом»

119017, Москва, ул. Большая Ордынка, 24



Представлены рекомендуемые соотношения для расчета термодинамических и транспортных свойств свинцово-висмутовой эвтектики (44,5% Pb + 55,5% Bi): плотности, коэффициента динамической вязкости, удельной теплоемкости, коэффициента теплопроводности, коэффициента поверхностного натяжения, удельного электрического сопротивления и местной скорости звука как функции температуры. Указанные соотношения построены на основании расчетного анализа данных, приведенных в 39-ти экспериментальных работах, выполненных в нашей стране и за рубежом и опубликованных с 1923 по 2015 гг. Авторы располагали сведениями о 1103-х экспериментальных точках, однако непосредственная оценка была выполнена по 1076-ти точкам. Основная сложность в проведении обработки данных заключалась в том, что рассмотренные в работе эксперименты были выполнены в разное время с использованием разнообразных методов измерений, не унифицированных методик статистической обработки, различной степени чистоты эвтектики и т.п. Основой методики оценки данных стал модифицированный метод наименьших квадратов, позволивший учесть погрешности принятых к рассмотрению экспериментальных данных.

В работе приводятся величины погрешностей предложенных соотношений и температурные диапазоны их применимости. Статья подготовлена по результатам работы центра данных термодинамических свойств (ЦДТС ИАТЭ НИЯУ МИФИ) ГК «Росатом».

Ключевые слова: свинцово-висмутовая эвтектика, теплоемкость, теплопроводность, местная скорость звука, регрессия, плотность, вязкость.

ВВЕДЕНИЕ

Эвтектический сплав свинец-висмут сравнительно недавно начал использоваться как теплоноситель преимущественно в транспортных ядерных энергетических установках [1, 2]. В настоящее время эта эвтектика рассматривается в качестве возможного теплоносителя для перспективных реакторных установок нового поколения [3].

© И.А. Чусов, В.Г. Проняев, Г.Е. Новиков, Н.А. Обысов, 2020

Обобщающий систематический анализ результатов экспериментов по определению транспортных и термодинамических свойств свинцово-висмутовой эвтектики был выполнен П.Л. Кирилловым с сотрудниками и приведен в работе [4].

За рубежом существуют публикации, обобщающие результаты исследований различных авторов [5, 6]. Однако в них не вошли результаты исследований российских специалистов, в частности, группы под руководством С.В. Станкуса (Новосибирск, Сибирское отделение АН РФ, Институт им. С.С. Кутателадзе) и группы под руководством Б.Б. Алчагирова (Нальчик, Кабардино-Балкарский государственный университет). Многочисленные эксперименты, выполненные этими специалистами, отличаются методической продуманностью, использованием современной приборной базы и тщательностью обработки экспериментальных результатов.

Появление новых данных привело к необходимости уточнения и коррекции существующих расчетных соотношений. Расчетный анализ был выполнен для следующих параметров: плотность, коэффициент динамической вязкости, удельная теплоемкость, коэффициент теплопроводности, коэффициент поверхностного натяжения, удельное электрическое сопротивление и скорость звука в сплаве.

С 2020 г. предложенные в данной работе соотношения являются рекомендованными Госкорпорацией «Росатом» РФ для расчета термодинамических свойств эвтектики свинец-висмут.

ОБЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Оценка термодинамических и транспортных свойств эвтектического сплава свинец-висмут была выполнена на основании экспериментальных данных, приведенных в 39-ти работах. Авторы данной работы располагали сведениями о 1103-х экспериментальных точках. Непосредственная оценка была выполнена по 1076-ти точкам. В таблице 1 приведены краткие сведения об экспериментальных работах и источниках, на основании которых были получены приведенные ниже соотношения.

Таблица 1

Сведения об источниках и диапазонах температур

Параметр	Число работ*	Период, гг.	Диапазон температур, К	Общее число точек	Число точек в оценке
Плотность	12	1952 – 2015	400 – 1225	594	594
Коэффициент динамической вязкости	8	1954 – 2015	400 – 1300	155	137
Удельная теплоемкость	3	1954 – 1973	400 – 950	19	11
Коэффициент теплопроводности	9	1923 – 2008	400 – 1000	122	121
Коэффициент поверхностного натяжения	10	1951 – 2008	400 – 1250	77	77
Удельное электрическое сопротивление	3	1954 – 2008	400 – 1050	24	24
Скорость звука	4	1975 – 2009	400 – 1400	112	112
* Число работ, по материалам которых проводился анализ					

Для определения сравнительной точности расчета свойств по рекомендованным соотношениям были выполнены расчеты по формулам из справочника, изданного NEA (Nuclear Energy Agency) [5], во многом основанного на материалах, приведенных в [6], обобщающей работе [4] и работе [8]. Результаты сравнения для каждого из рассмотренных термодинамического или транспортного свойств представлены далее в табл. 2.

РЕКОМЕНДУЕМЫЕ РЕГРЕССИОННЫЕ СООТНОШЕНИЯ И ИХ ПОГРЕШНОСТИ

1. Уравнение регрессии для плотности эвтектики свинец-висмут получено на основании анализа 12-ти экспериментальных работ [9 – 20], в которых даны сведения о 594-х экспериментальных точках, полученных в 1952 – 2015 гг. Обработка данных выполнена по методике, краткое описание которой приведено в [7].

Рекомендуемое соотношение для плотности свинцово-висмутовой эвтектики имеет вид

$$\rho = 1,1 \cdot 10^4 - 1,223 \cdot T, \quad (1)$$

где T – температура, К; ρ – плотность, кг/м³. Диапазон применимости 400 – 1225 К. Графическое представление экспериментального материала с кривой регрессии показано на рис. 1. Здесь же нанесены кривые зависимостей плотности чистого свинца и висмута от температуры. Все экспериментальные данные достаточно плотно размещаются на линии аппроксимации. Как и следовало ожидать, экспериментальные точки для эвтектики легли между зависимостями для чистого свинца и висмута. Обозначения S1 – S4 на легенде возле фамилий некоторых авторов означают, что сведения приведены о нескольких сериях экспериментов.

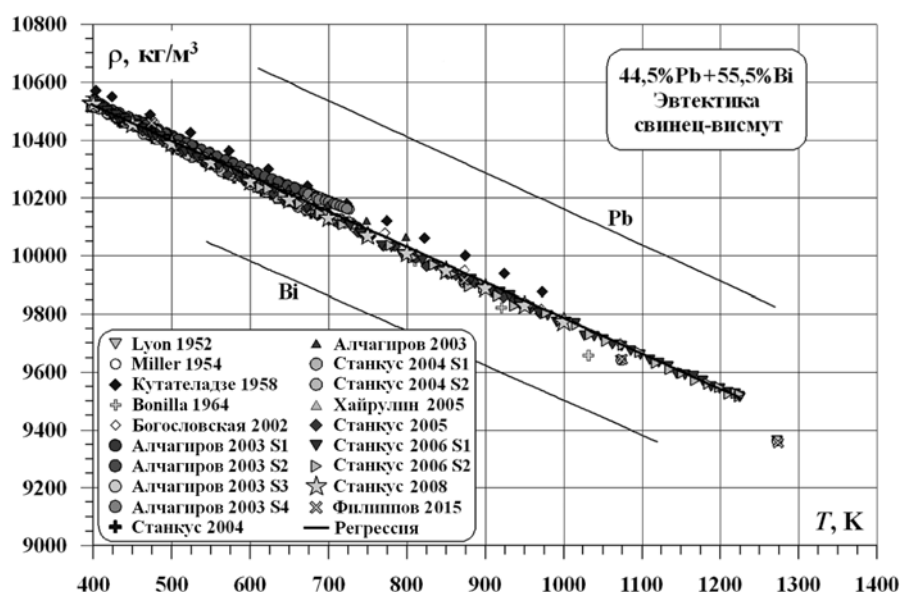


Рис. 1. Зависимость плотности эвтектики Рb-Вi, Рb и Вi от температуры

2. Уравнение для расчета коэффициента динамической вязкости эвтектики свинец-висмут в жидкой фазе получено на основании анализа экспериментальных данных, приведенных в работах [4, 10, 11, 23 – 25], и имеет вид

$$\mu = 8,65 \cdot 10^{-4} + 1,77 \cdot 10^{-2} \cdot \exp(-T/200,5), \quad (2)$$

где μ – коэффициент динамической вязкости, Па·с. Соотношение (2) применимо в диапазоне температур 400 – 1300 К.

Графическое представление результатов расчета по соотношению (2) приведено на рис. 2. Всего в работах [4, 10, 11, 23 – 25] даны сведения о 155-ти экспериментальных точках, из которых в оценке были задействованы 137.

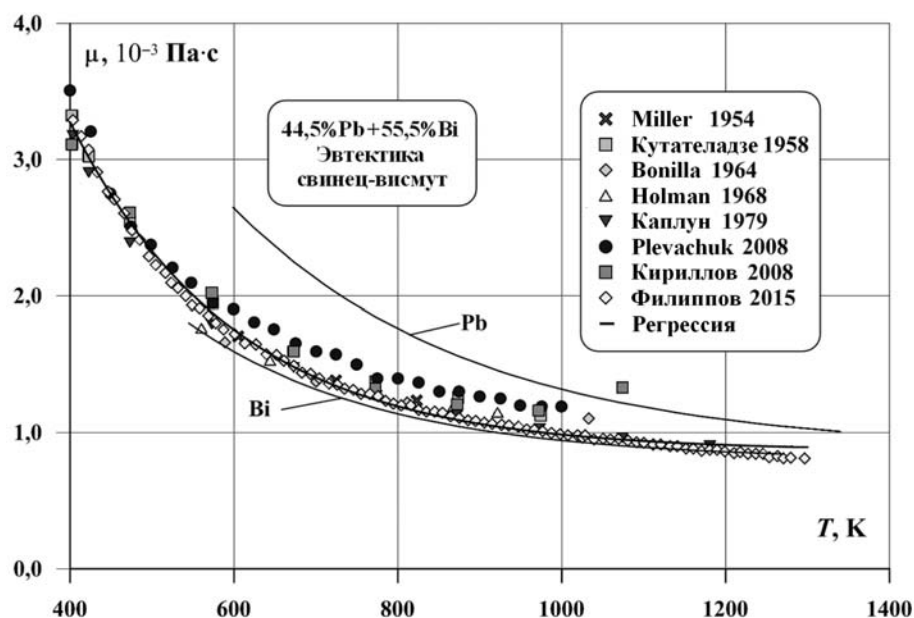


Рис. 2. Зависимость коэффициента динамической вязкости эвтектики Pb-Bi, Pb и Bi от температуры

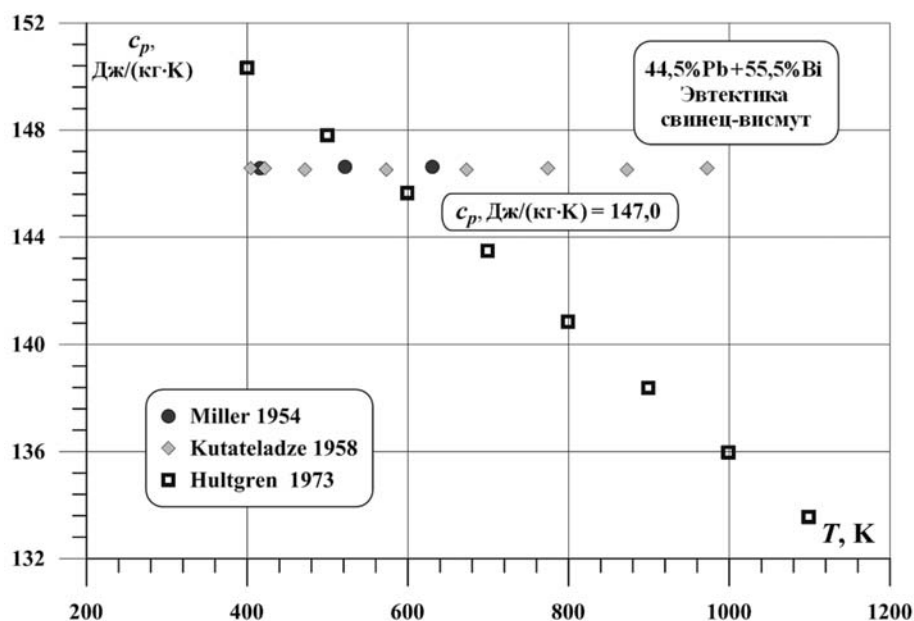


Рис. 3. Зависимость удельной теплоемкости эвтектики Pb-Bi от температуры

3. Соотношение для удельной теплоемкости c_p эвтектики свинец-висмут в жидкой фазе было получено на основании обработки данных, приведенных в работах [10, 11, 26]:

$$c_p = 147,0 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К}). \quad (3)$$

Диапазон применимости 400 – 950 К. Экспериментальные данные показаны на рис. 3. В трех цитируемых работах указаны сведения лишь о 19-ти эксперименталь-

ных точек. Для обоснования соотношения (3) использовалось 11 экспериментальных точек.

Особо отметим, что получение экспериментальных данных по удельной теплоемкости эвтектики связано с большими техническими трудностями и требует применения достаточно дорогостоящей аппаратуры. Это связано со сложностью измерения потоков тепла при высоких температурах, когда значительно возрастают тепловые потери за счет конвективного и радиационного переносов.

К настоящему времени однозначной теории теплопроводности не существует. В наиболее общем случае теплопроводность зависит от температуры, химического состава и т.д.

4. Рекомендованное соотношение для расчета коэффициента теплопроводности эвтектики в жидкой фазе, полученное на основании экспериментальных данных работ [3, 4, 21, 27, 30, 33 – 40], имеет вид

$$\lambda = 3,615 + 0,0172 T + 0,405 \cdot 10^{-5} T^2, \quad (4)$$

где λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К). Соотношение применимо в диапазоне от 400 до 1000 К. Всего в упомянутых работах были получены 122 экспериментальные точки. Расчетная оценка выполнена по 121 экспериментальным точкам.

График для уравнения (4) показан на рис. 4.

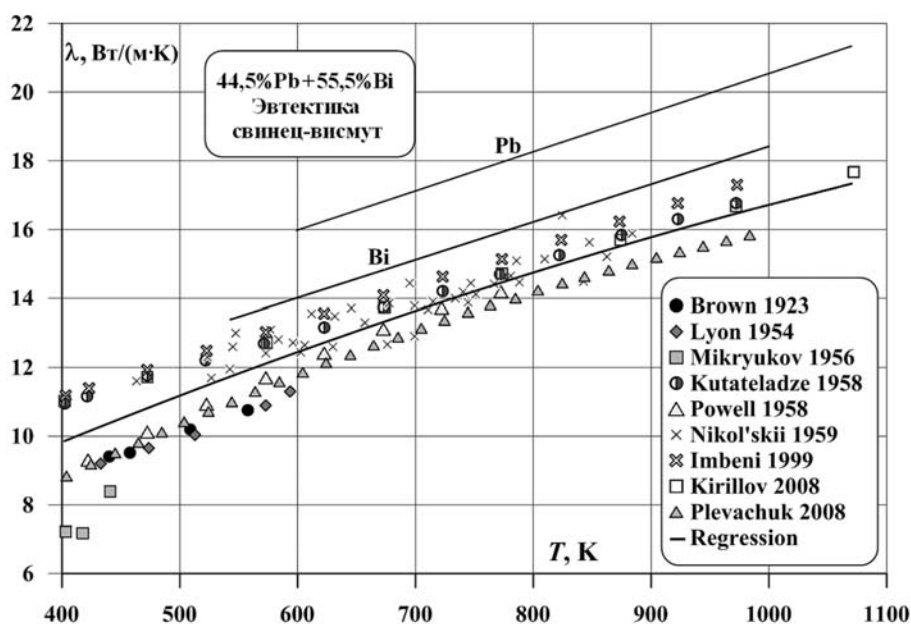


Рис. 4. Зависимость коэффициента теплопроводности эвтектики Pb-Bi, Pb и Bi от температуры

Особо отметим, что экспериментальные данные, приведенные на этом рисунке, расходятся в среднем на 25%. Такой разброс вызван, видимо, большим содержанием примесей в висмуте. К сожалению, в большинстве экспериментальных работ сведения о процентном содержании примесей в исходном опытном материале отсутствуют. Авторы данной работы могли только предполагать их наличие. На основании этого основополагающими аргументами при отборе данных для проведения оценки играли факты отклонения тренда экспериментальных данных, приведенных в конкретной работе, от общего тренда и явное «выпадение» отдельных точек из общего массива данных.

5. Уравнение регрессии для коэффициента поверхностного натяжения эвтектики свинец-висмут получено на основании анализа экспериментальных данных ра-

бот [10, 23, 24, 32–38] и имеет вид

$$\sigma = (441,1 - 0,0711 \cdot T) \cdot 10^{-3}, \quad (5)$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения, Н/м. Интервал температур 400 – 1370 К.

График для соотношения (5) и экспериментальные данные показаны на рис. 5.

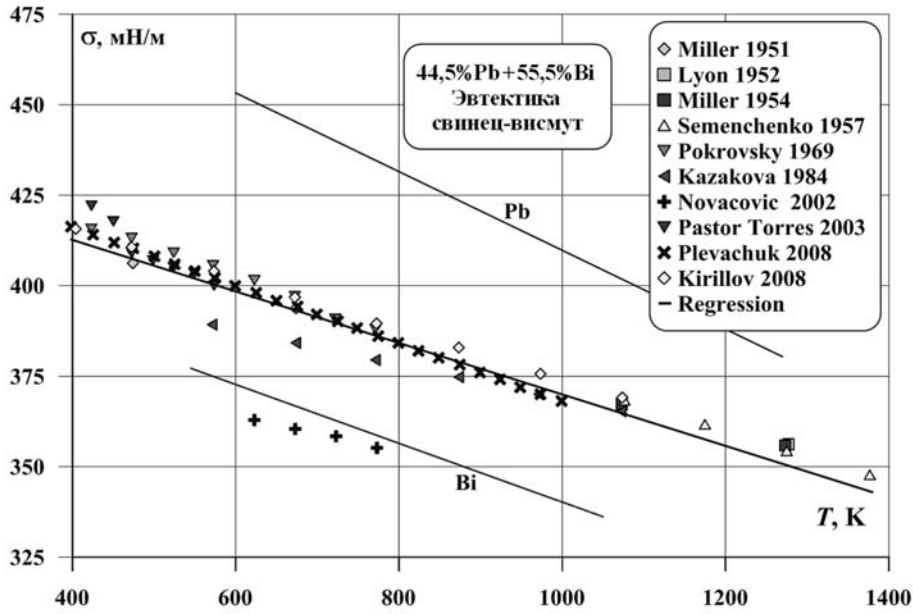


Рис. 5. Зависимость коэффициента поверхностного натяжения эвтектики Pb-Bi, Pb и Bi от температуры

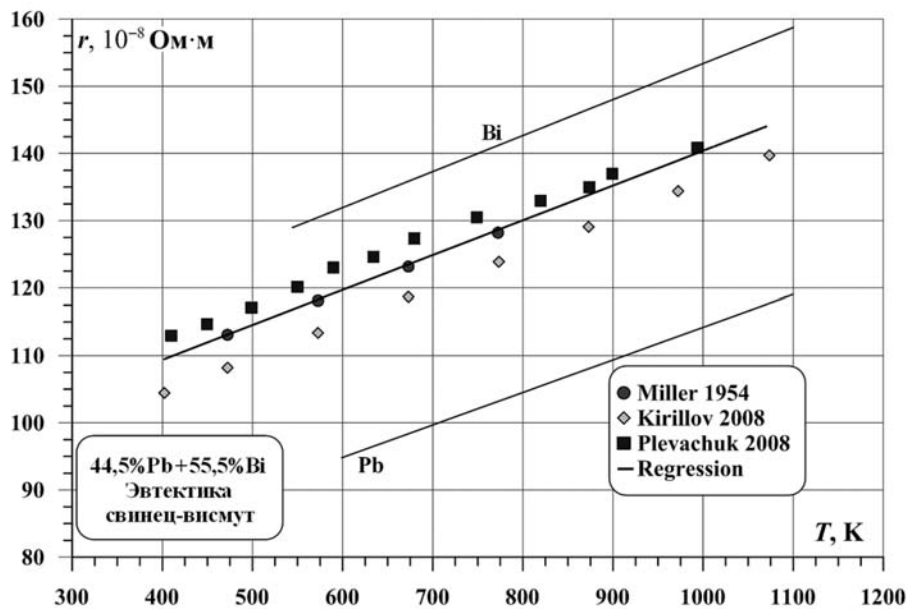


Рис. 6. Зависимость удельного электрического сопротивления эвтектики Pb-Bi, Pb и Bi от температуры

6. Регрессионное уравнение для удельного электрического сопротивления эвтектики свинец-висмут, находящейся в жидкой фазе, получено на основании анализа экспериментальных данных из [10, 23, 24] и имеет вид

$$r = (88,71 + 0,052 \cdot T) \cdot 10^{-8}, \quad (6)$$

где r – удельное электрическое сопротивление, Ом·м. Диапазон температур 400 – 1050 К.

График для соотношения (6) и экспериментальные данные показаны на рис. 6. Аппроксимация выполнялась по 24-м экспериментальным точкам.

7. Оценка величины местной скорости звука в свинцово-висмутовой эвтектике получена на основании анализа 112-ти экспериментальных точек из работ [39 – 43]. Регрессионное уравнение для ее расчета имеет вид

$$u = 1,855 \cdot 10^3 - 0,257 \cdot T, \quad (7)$$

где u – скорость звука, м/с. Диапазон температур от 400 до 1400 К.

Результаты расчета по соотношению (7) представлены на рис. 7.

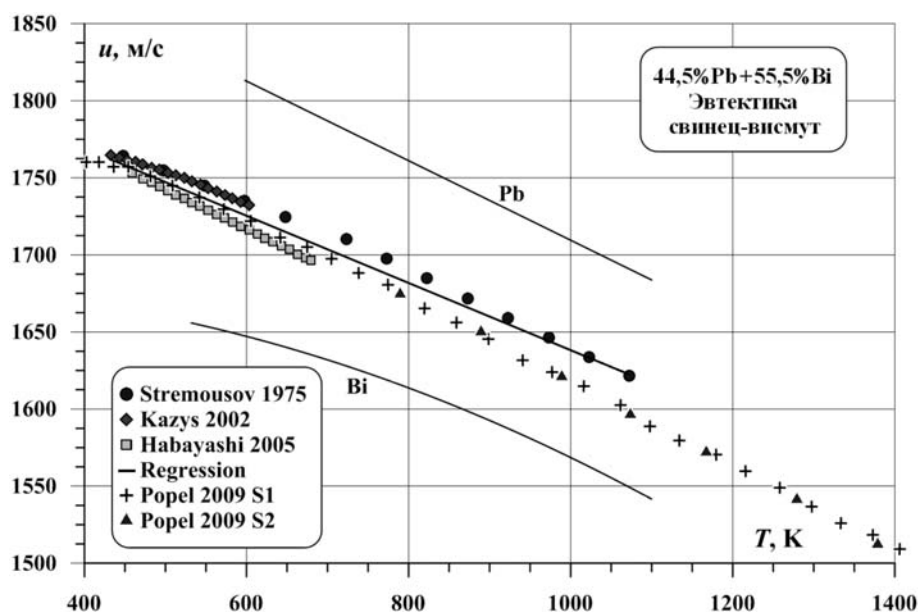


Рис. 7. Зависимость скорости звука в эвтектике Pb-Bi, Pb и Bi от температуры

Величины относительных погрешностей для соотношений (1) – (7) и погрешностей, приведенных в работах [4, 5], представлены в табл. 2.

Таблица 2

Относительные погрешности уравнений регрессии (1) – (7) для параметров эвтектики свинец-висмут в сравнении с данными работ [4, 5], %

Параметр	Данная работа	Кириллов [4]	NEA [5]
Плотность	0,25	0,33	0,29
Коэффициент динамической вязкости	3,22	24,0	4,95
Удельная теплоемкость	1,83	2,07	37,86
Коэффициент теплопроводности	5,3	–	3,87
Коэффициент поверхностного натяжения	1,21	1,17	1,4
Удельное электрическое сопротивление	2,43	3,99	2,5
Местная скорость звука	0,4	–	0,8

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведены полуэмпирические зависимости для расчета ряда транспортных и термодинамических свойств эвтектики свинец-висмут, находящейся в жидкой фазе. Зависимости были получены на основании анализа экспериментальных данных, приведенных в 39-ти опубликованных за период с 1923 по 2015 гг. работах. Указаны температурные диапазоны применимости рекомендованных соотношений и погрешности расчета для семи основных параметров, характеризующих эвтектику Pb-Bi, – плотность, коэффициент динамической вязкости, удельная теплоемкость, коэффициент теплопроводности, коэффициент поверхностного натяжения, удельное электрическое сопротивление и местная скорость звука.

Литература

1. Тошинский Г.И., Степанов В.С., Никитин Л.Б. и др. Анализ опыта эксплуатации реакторных установок с теплоносителем свинец-висмут и имевших место аварий. / Труды конф. «Тяжелые жидкометаллические теплоносители в ядерных технологиях», ТЖМТ-98. – г. Обнинск: ГНЦ РФ-ФЭИ, 1999. – Т. 1. – С. 63–69.
2. Зродников А.В., Тошинский Г.И., Степанов В.С. Конверсия свинцово-висмутовой реакторной технологии: от реакторов АПЛ к энергетическим реакторам и пути повышения инвестиционной привлекательности ядерной энергетики на базе быстрых реакторов. / IAEA CN AZ. Докл. на Межд. конф. МАГАТЭ «Fifty Years of Nuclear Power – the Next Fifty Years» Обнинск, 27 июня – 2 июля, 2004. Электронный ресурс: CD-ROM. www.akmeengineering.com.
3. Джангобегов В.В., Пиминов В.А., Мохов В.А. и др. Современные проекты ОКБ «ГИДРОПРЕСС». Разработка и реализация. // Приложение к научно-техническому сборнику ВАНТ. Сер. Обеспечение безопасности АЭС. – 2015. – Вып. 35. «Реакторные установки» – Подольск: АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС», 2015. – 64 с.
4. Кириллов П.Л. Теплофизические свойства свинца, висмута и их эвтектического сплава. / Обзор ФЭИ-0286. – М.: ЦНИИАтоминформ, 1998. – 28 с.
5. Handbook on Lead-Bismuth Eutectic Alloy and Lead Properties, Materials Compatibility, Thermalhydraulics and Technologies. 2015 Edition. – OECD 2015. Nuclear Energy Agency. – NEA. No. 7268.
6. Sobolev V. Database of Thermophysical Properties of Liquid Metal Coolants for GEN-IV. Sodium, Lead, Lead-Bismuth Eutectic (and Bismuth). / Scientific Report of the Belgian Nuclear Research Centre. – SCK•CEN-BLG-1069, Nov. 2010 (rev. Dec. 2011).
7. Чусов И.А., Обысов Н.А., Новиков Г.Е., Проняев В.Г. Расчетные соотношения для определения термодинамических свойств свинцового теплоносителя. // ВАНТ. Серия: Физика ядерных реакторов. – 2019. – Вып. 2. – С. 83–91.
8. Bogoslovskaya G.P. et al. Comparative Assessment of Thermophysical and Thermohydraulic Characteristics of Lead, Lead-Bismuth and Sodium Coolants for Fast Reactors, IAEA TECDOC-1289. – IAEA, Vienna, 2002.
9. Lyon R.N. Liquid Metals Handbook, second ed. – Washington, USA: US Atomic Energy Commission and Dept. of the Navy, 1952. – 733 p.
10. Miller R.R., Lyon R.N. et al. Physical Properties of Liquid Metals, Liquid Metals Handbook. / R.N. Lyon (ed.), 2nd edition. Report NAVEXOSP-733. – Atomic Energy Commission and Dept. of the Navy, Washington, USA, 1954.
11. Кутателадзе С.С., Боришанский В.М., Новиков И.И., Федынский О.С. Жидкометаллические теплоносители. – М.: Атомиздат, 1958. – 298 с.
12. Bonilla C.F. Heat Transfer, Chapter 2 in «Reactor Handbook», 2nd Ed., Vol. IV, Engineering. – Interscience Publishers, New York, USA, 1964. – 677 p.
13. Алчагуров Б.Б., Куршев О.И., Мозговой А.Г. Поверхностное натяжение жидкой свинцово-висмутовой эвтектики при технически важных температурах. // Перспективные материалы. – 2003. – № 6. – С. 50–54.
14. Станкус С.В., Хайрулин Р.А., Мозговой А.Г. Плотность расплавленной свинцово-вис-

мутовой эвтектики при высоких температурах. // Перспективные материалы. – 2004. – № 4. – С. 38-43.

15. Алчагиров Б.Б., Шампаров Т.М., Мозговой А.Г. Экспериментальное исследование плотности расплавленной свинцово-висмутовой эвтектики. // Теплофизика высоких температур. – 2003. – Т. 41. – Вып. 2. – С. 247-253.

16. Станкус С.В., Хайрулин Р.А., Мозговой А.Г. Термические свойства жидкометаллического теплоносителя для ядерных реакторов на быстрых нейтронах. // Перспективные материалы. – 2005. – № 3. – С. 41-45.

17. *Khairulin R.A., Lyapunov K.M., Mozgovo A.G., Stankus S.V., Ulyusov P.V.* Crystallization and relaxation phenomena in the bismuth-lead eutectic. // Journal of Alloys and Compounds. – 2005. – Vol. 387. – PP. 183-186.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2004.06.045>.

18. Станкус С.В., Хайрулин Р.А., Мозговой А.В. Термические свойства жидкометаллического теплоносителя для ядерных реакторов на быстрых нейтронах. // Перспективные материалы. – 2005. – № 3. – С. 41-45.

19. Станкус С.В., Хайрулин Р.А., Мозговой А.Г., Рошчупкин В.В., Покрасин М.А. Плотность жидкометаллического теплоносителя на основе свинцово-висмутовой эвтектики при высоких температурах. // Теплофизика высоких температур. – 2006. – Т. 44. – Вып. 2. – С. 307-310. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10740-006-0038-7>.

20. *Stankus S.V., Khairulin R.A., Mozgovoy A.G., Roshchupkin V.V. and Pokrasin M.A.* The density and thermal expansion of eutectic alloys of lead with bismuth and lithium in condensed state. / XIII-th International Conference on Liquid and Amorphous Metals IOP Publishing. // Journal of Physics: Conference Series. – 2008. – Vol. 98. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/98/6/062017>.

21. *Holman J.P.* Heat Transfer. – MacGraw-Hill, 1964, USA. – 463 p.

22. Каплун А.Б., Шугаев В.М., Минаков С.П., Варламов Ю.Д. Вязкость эвтектического сплава свинец-висмут. / В сб.: Теплофизические свойства веществ и материалов. – Новосибирск: Институт теплофизики СО АН СССР, 1979. – С. 105.

23. *Plevachuk Yu., Sklyarchuk V., Eckert S., Gerbeth G.* Some Physical Data of the Near Eutectic Liquid Lead-Bismuth. // J. Nucl. Mater. – 2008, – Vol. 373. – PP. 335-342. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2007.06.014>.

24. *Kirillov P.L.* Thermophysical Properties of Materials for Nuclear Engineering: A Tutorial and Collection of Data, – IAEA, Vienna, 2008. – 167 p. Электронный ресурс: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/IAEA-THPH_web.pdf (дата доступа 10.10.2019)

25. *Filippov V.V., Yagodin D.A., Borisenko A.V., Shunyaev K.Yu. and Gelchinski B.R.* Density, Viscosity, Ultrasound Velocity, and Electrical Resistivity of the Eutectic Lead-Bismuth Melt. // Russian Metallurgy (Metally). – 2016. – No. 8. – PP. 705-708.

DOI: <https://doi.org/10.1134/S0036029516020038>.

26. *Hultgren R. et al.* Selected Values of the Thermodynamic Properties of Binary Alloys. – ASM, Metals Park, Ohio, USA, 1973. – 1435 p.

27. *Brown W.B.* Thermal Conductivities of Some Metals in the Solid and Liquid States. // Physical Review. – 1923. – Vol. 22. – P. 171. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRev.22.171>.

28. Микрюков В.Е., Тяпунина Н.А. Исследование температурной зависимости теплопроводности, электропроводности и теплоемкости Bi, Pb и системы сплавов Bi-Pb. // Физика металлов и металловедение. – 1956. – № 1. – С. 31-41.

29. Никольский Н.А., Калакуцкая Н.А., Пчелкин И.М. Теплофизические свойства некоторых металлов и сплавов в расплавленном состоянии. / Вопросы теплообмена: сборник статей. – М.: Изд-во АН СССР, 1959. – С. 11-45.

30. *Powell R.W., Tye R.P.* Experimental determination of the thermal and electrical conductivities of molten metals / In: Proc. of the Conf. «Thermodynamic and Transport Properties of Fluids». – London: Inst. Mech. Eng, 1958. – PP. 182-187.

31. *Imbeni V., Martini C., Masini S., Palombarini G.* State of the art on the chemical-physical properties of Pb and Pb-Bi. Part II. Properties of Pb and Pb-Bi, Na, in Study of a

superconductive accelerator of high-powered protons and study of a subcritical system it supports for the burning of radioactive waste, Sub-theme 2: Corrosion tests, BoMet, Programme agreement. ENEA/INFN-MURST, Settore Ambiente, December 1999 (in Italian).

32. *Miller R.R.* Physical Properties of Liquid Metals. In: Liquid Metal Handbook. Lyon, R.N. (2-nd Ed.), Report NAVEXOS P-733, Atomic Energy Commission and Dept. of the Navy, Washington, USA, June 1952 (rev. 1954).

33. *Lyon R.N.* Liquid Metals Handbook, second ed. – Washington, USA: US Atomic Energy Commission and Dept. of the Navy, 1952. – 733 p.

34. *Покровский Н.Л., Пугачевич П.П., Голубев П.А.* Исследование поверхностного натяжения растворов свинец-висмут. // Журнал физической химии. – 1969. – Т. 43. – Вып. 8. – С. 2158-2159.

35. *Казакова Н.В., Лямкин С.А., Лепинских Б.М.* Плотность и поверхностное натяжение расплавов системы Pb-Bi. // Журнал физической химии. – 1984. – Т. 58. – Вып. 6. – С. 1534-1538.

36. *Novakovich R., Richch i E., Giuranno D., Gnechcho F.* Surface Properties of Bi-Pb Liquid Alloys. // Surface Sci. – 2002. – Vol. 515. – PP. 377-389. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0039-6028\(02\)01923-4](https://doi.org/10.1016/S0039-6028(02)01923-4).

37. *Pastor Torres F.C.* Surface Tension Measurement of Heavy Liquid Metals Related to Accelerator Driven Systems (ADS). / Diploma Thesis, FZK (IKET), KALLA, April 2003.

38. *Семенченко В.К.* Поверхностные явления в металлах и сплавах. – М.: Гос. изд-во технико-теорет. лит., 1957. – 491 с.

39. *Стремоусов В.И., Соломин Б.А.* Скорость звука в тройной жидкометаллической системе Bi-Pb-Sn // Журнал физической химии. – 1975. – Т. 49. – №8. – С. 1972-1974.

40. *Kazys R., Voleisis A., Sliteris R. et al.* Development of Ultrasonic Sensors for Operation in a Heavy Liquid Metal. // IEEE Sensors Journal. – 2006. – Vol. 6. – Iss. 5. – PP. 1134-1143. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2006.877997>

41. *Hirabayashi M. et al.* Development of ultrasonic flow meter for liquid lead-bismuth flow. / Proc. of the XIII-th International Conference on Nuclear Engineering, Beijing, China, May 16-20, 2005. – ICONE13-50346. Электронный ресурс: <https://inis.iaea.org> (дата доступа 10.10.2019).

42. ГСССД 236-2009. Таблицы стандартных справочных данных. Скорость звука в жидком свинце, висмуте и их эвтектическом сплаве в диапазоне от температур плавления до 1300 К. – М.: ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ», 2009. – 32 с.

43. *Попель П.С., Ягодин Д.А., Мозговой А.Г., Покрасин М.А.* Экспериментальное исследование скорости звука в расплавленном свинце, висмуте и их взаимном эвтектическом сплаве при высоких температурах. // Теплофизика высоких температур, – 2010. – Т. 48. – №2. – С. 90-98. Электронный ресурс: <https://gsssd-rosatom.mephi.ru/biblio-pdf/003/pdf/>. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0018151X10020070> (дата доступа 10.10.2019).

Поступила в редакцию 14.10.2019 г.

Авторы

Чусов Игорь Александрович, профессор, д-р техн. наук

E-mail: igrch@mail.ru

Проняев Владимир Григорьевич, ведущий научный сотрудник, канд. физ.-мат. наук

E-mail: vgpronyaev@yandex.ru

Новиков Григорий Евгеньевич, главный специалист департамента технического регулирования ГК «Росатом»

E-mail: genovikov@rosatom.ru

Обысов Николай Александрович, главный метролог ГК «Росатом»

E-mail: info@rosatom.ru

UDC 621.039.5

RELATIONS FOR CALCULATING THE TRANSPORT AND THERMODYNAMIC PROPERTIES OF LEAD-BISMUTH EUTECTICS

Chusov I.A. *, **, Pronyaev V.G. *, Novikov G.E. ***, Obysov N.A. ***

* Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering, NRNU MEPhI

1 Stugorodok, Obninsk, Kaluga reg., 249040 Russia

** Federal State Unitary Enterprise OKB Hidropress

21 Ordzhonikidze str., Podolsk, Moscow reg., 142103 Russia

*** Rosatom State Atomic Energy Corporation

24 Bol'shaya Ordynka str., Moscow, 119017 Russia

ABSTRACT

The eutectic lead-bismuth alloy has relatively recently begun to be used as a coolant primarily in nuclear transport power plants. At present, this eutectic is regarded as a possible coolant for promising new generation reactor plants.

The generalized systematic analysis of the results of experiments to determine the transport and thermodynamic properties of lead-bismuth eutectics was carried out by P.L. Kirillov with his staff and published back in 1998. However, they do not include numerous experimental results of studies of Russian specialists, which are characterized by methodical thoughtfulness, use of modern instrumentation and careful data processing. The emergence of new data has led to the need to clarify and correct the existing computational relationships.

Recommended ratios for calculating the thermodynamic and transport properties of lead-bismuth eutectics (44.5% Pb + 55.5% Bi) are presented: density, coefficient of dynamic viscosity, specific heat capacity, thermal conductivity coefficient, surface tension coefficient, specific electrical resistance and local sound velocity as a function of temperature. The mentioned relations are based on the calculated analysis of data given in 38 experimental works carried out in our country and abroad and published for the period from 1923 to 2015. The authors had information about 1085 experimental points, but only 1058 points were suitable for direct estimates. The main difficulty in data processing was that the experiments considered in the work were carried out at different times using various measurement methods, ununiform statistical processing methods, different degree of bismuth purity, etc. The basis of data evaluation methods was a modified method of least squares, which allowed taking into account the errors of the experimental data accepted for consideration.

Error values of the proposed relations and temperature ranges of their applicability are given in this paper. The article is based on the results of the work of the Thermodynamic Properties Data Center (TsDTS IATE NIYaU MIFI) of Rosatom State Corporation.

Key words: lead-bismuth eutectic, heat capacity, thermal conductivity, local sound velocity, regression, density, viscosity.

REFERENCES

1. Toshinsky G.I., Stepanov V.S., Nikitin L.B., Zrodnikov A.V., Komlev O.G. Analysis of Operating Experience of Lead-Bismuth Reactor Units and Accidents. *Proc. of the Conf. «Heavy liquid-metal coolants in nuclear technologies», TZhMT-98. Obninsk. SSC RF-FEI, 1999, v. 1, pp. 63-69 (in Russian).*
2. Zrodnikov A.V., Toshinsky G.I., Stepanov V.S. Conversion of Lead-Bismuth Reactor

Technology: from Submarine Reactors to Power Reactors and Ways to Increase Investment Attractiveness of Fast Reactor Based Nuclear Power Engineering. *IAEA CNA3. Reports at the IAEA International Conf. «Fifty Years of Nuclear Power – the Next Fifty Years»* Obninsk, 27 June - 2 July, 2004 (in Russian).

3. Dzhangobegov V.V., Piminov V.A., Mokhov V.A., Schekin I.G., Stepanov V.S., Ignatov A.V., Lisenkov E.A., Klimkin A.S.. Modern Projects of OKB GIDROPRESS. Development and Implementation. *Appendix to the scientific and technical collection of VANT. Ser. Obespechenie Bezopasnosti AES*. 2015, iss. 35, «Reaktornye Ustanovki». Podolsk. JSC OKB GIDROPRESS Publ., 2015, 64 p. (in Russian).

4. Kirillov P.L. *Thermophysical Properties of Lead, Bismuth and their Eutectic Alloy. FEI-0286 Review*. Moscow. TsNIIAtominform Publ., 1998, 28 p. (in Russian).

5. *Handbook on Lead-bismuth Eutectic Alloy and Lead Properties, Materials Compatibility, Thermalhydraulics and Technologies*. 2015 Edition. OECD 2015. NUCLEAR ENERGY AGENCY. NEA. No. 7268.

6. Sobolev V. Database of Thermophysical Properties of Liquid Metal Coolants for GEN-IV. Sodium, Lead, Lead-Bismuth Eutectic (and Bismuth). *Scientific Report of the Belgian Nuclear Research Centre, SCK•CEN-BLG-1069*, November 2010 (rev. Dec. 2011).

7. Chusov I.A., Obysov N.A., Novikov G.E., Pronyaev V.G. Estimated Ratios for Determining the Thermodynamic Properties of Lead Coolant. *VANT. Ser: Fizika Yadernykh Reaktorov*. 2019, iss. 2, pp. 83-91 (in Russian).

8. Bogoslovskaya G.P. Kirillov P.L., Kupiz J., Heusener G., Nishi Y., Rineikii A., Stangulesku A., Wade D., Yarovitsin V.V. Comparative Assessment of Thermophysical and Thermohydraulic Characteristics of Lead, Lead-Bismuth and Sodium Coolants for Fast Reactors. *IAEA TECDOC-1289*, IAEA, Vienna, 2002.

9. Lyon R.N. *Liquid Metals Handbook*, 2-nd ed. Washington, USA: US Atomic Energy Commission and Dept. of the Navy, 1952. 733 p.

10. Miller R.R., Lyon R.N. et al. *Physical Properties of Liquid Metals*, Liquid Metals Handbook, R.N. Lyon (ed.), 2nd Ed., Report NAVEXOS P-733, Atomic Energy Commission and Dept. of the Navy, Washington, USA, 1954.

11. Kutateladze S.S., Borishansky V.M., Novikov I.I., Fedynsky O.S. *Liquid-Metal Coolants*. Moscow. Atomizdat Publ., 1958, 298 p. (in Russian).

12. Bonilla C.F. Heat Transfer, Chapter 2 in «*Reactor Handbook*», 2nd Ed. (rev., enl.), Vol. IV, Engineering, S. McLain and J.H. Martens (Eds.). Interscience Publishers, New York, USA, 1964.

13. Alchagirov B.B., Kurshev O.I., Brain A.G. Surface Tension of Liquid Lead-Bismuth Eutectics at Technically Important Temperatures. *Perspektivnye Materialy*. 2003, no. 6, pp. 50-54 (in Russian).

14. Stankus S.V., Hairulin R.A., Brain A.G. Density of molten lead-bismuth eutectics at high temperatures. (in Russian) *Perspektivnye Materialy*. 2004, no. 4, pp. 38-43 (in Russian).

15. Alchagirov B.B., Shamparov T.M., Brain A.G. Experimental study of molten lead-bismuth eutectics density. *Teplofizika Vysokikh Temperatur*. 2003, v. 41, iss. 2, pp. 247-253 (in Russian).

16. Stankus S.V., Hairulin R.A., Mozgovoi A.G. Thermal Properties of Liquid Metallic Thermal Carrier for Fast Neutron Nuclear Reactors. *Perspektivnye Materialy*. 2005, no. 3, pp. 41-45 (in Russian).

17. Khairulin R.A., Lyapunov K.M., Mozgovoi A.G., Stankus S.V., Ulyusov P.V. Crystallization and Relaxation Phenomena in the Bismuth-Lead Eutectic. *Journal of Alloys and Compounds*. 2005, v. 387, pp. 183-186. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2004.06.045>.

18. Stankus S.V., Khayrulin R.A., Mozgovoi A.G. Thermal Properties of Liquid Metal Coolant for Fast Neutron Reactors. *Perspektivnye Materialy*. 2005, no. 3, pp. 41-45 (in Russian).

19. Stankus S.V., Khairulin R.A., Mozgovoy A.G., Roshchupkin V.V., Pokrasin M.A. The density of the liquid metal coolant based on lead-bismuth eutectic at high temperatures. *Teplofizika Vysokikh Temperatur*. 2006, v. 44, iss. 2, pp. 307-310. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10740-006-0038-7> (in Russian).

20. Stankus S.V., Khairulin R.A., Mozgovoy A.G., Roshchupkin V.V. and Pokrasin M.A. The Density and Thermal Expansion of Eutectic Alloys of Lead with Bismuth and Lithium in Condensed State. *XII-th International Conference on Liquid and Amorphous Metals IOP Publishing, Journal of Physics: Conference Series*. 2008, v. 98; DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/98/6/062017>.
21. Holman J.P. *Heat Transfer*. MacGraw-Hill, 1964, USA. 463 p.
22. Kaplun A.B., Shugaev V.M., Minakov S.P., Varlamov Yu.D. Viscosity of the Eutectic Alloy Lead-Bismuth. In the collection: *Thermophysical Properties of Substances and Materials*. Novosibirsk. Institute of Thermophysics, Siberian Branch of the Academy of Sciences of the USSR Publ., 1979, p. 105 (in Russian).
23. Plevachuk Yu., Sklyarchuk V., Eckert S., Gerbeth G. Some Physical Data of the Near Eutectic Liquid Lead-Bismuth. *J. Nucl. Mater.* 1008, v. 373, pp. 335-342. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2007.06.014>.
24. Kirillov P.L. *Thermophysical Properties of Materials for Nuclear Engineering: A Tutorial and Collection of Data*. IAEA, Vienna, 2008, 167 p. Available at: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/IAEA-THPH_web.pdf (accessed Oct 10, 2019).
25. Filippov V.V., Yagodin D.A., Borisenko A.V., Shunyaev K.Yu. and Gelchinski B.R. Density, Viscosity, Ultrasound Velocity, and Electrical Resistivity of the Eutectic Lead-Bismuth Melt. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2016, no. 8, pp. 705-708. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0036029516020038>.
26. Hultgren R., Desai P.D., Hawkins D.T., Gleiser M., Kelley K.K. *Selected Values of the Thermodynamic Properties of Binary Alloys*. ASM, Metals Park, Ohio, USA, 1973, 1435 p.
27. Brown W.B. Thermal Conductivities of Some Metals in the Solid and Liquid States. *Physical Review*. 1923, v. 22, p. 171. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRev.22.171>.
28. Mikryukov V.E., Tyapunina N.A. Investigation of the Temperature Dependence of the Thermal Conductivity, Electrical Conductivity and Heat Capacity of Bi, Pb and the Bi-Pb Alloy System. *Fizika Metallov i Metallovedenie*. 1956, no. 1, pp. 31-41 (in Russian).
29. Nikolsky N.A., Kalakutskaya N.A., Pchelkin I.M. Thermophysical Properties of some Metals and Alloys in the Molten State. In: *Heat Transfer Issues*. Moscow. USSR Academy of Sciences Publ., 1959, pp. 11-45 (in Russian).
30. Powell R.W., Tye R.P. Experimental determination of the thermal and electrical conductivities of molten metals. *Proc. of the Conf. «Thermodynamic and Transport Properties of Fluids»*. London: Inst. Mech. Eng., 1958, pp. 182-187.
31. Imbeni V., Martini C., Masini S., Palombarini G. Stato dell'arte sulle proprietà chimico-fisiche del Pb e Pb-Bi. Parte II. Proprietà di Pb e Pb-Bi, Na, in Studio di un acceleratore superconduttivo di protoni di grande potenza e studio di un sistema sottocritico da esso sostenuto per il bruciamento dei residui radioattivi, Sottotema 2: Prove di corrosione, BoMet, Accordo di programma ENEA/INFN-MURST, Settore Ambiente, December 1999 (in Italian).
32. Miller R.R. Physical Properties of Liquid Metals. In: *Liquid Metal Handbook*. Lyon R.N. (2-nd Ed.), Report NAVEXOS P-733, Atomic Energy Commission and Dept. of the Navy, Washington, USA, June 1952 (rev. 1954).
33. Lyon R.N. *Liquid Metals Handbook*, 2-nd ed. – Washington, USA: US Atomic Energy Commission and Dept. of the Navy, 1952. 733 p.
34. Pokrovsky N.L., Pugachevich P.P., Golubev P.A. Study of the Surface Tension of Lead-Bismuth Solutions. *Zhurnal Fizicheskoy Khimii*. 1969, v. 43, iss. 8, pp. 2158-2159 (in Russian).
35. Kazakova N.V., Lyamkin S.A., Lepinskikh B.M. Density and Surface Tension of Pb-Bi System Melts. *Zhurnal Fizicheskoy Khimii*. 1984, v. 58, iss. 6, pp. 1534-1538 (in Russian).
36. Novakovich R., Richch i E., Giuranno D., Gnechcho F. Surface Properties of Bi-Pb Liquid Alloys. *Surface Sci.* 2002, v. 515, pp. 377-389. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0039-6028\(02\)01923-4](https://doi.org/10.1016/S0039-6028(02)01923-4).
37. Pastor Torres F.C. *Surface Tension Measurement of Heavy Liquid Metals Related to Accelerator Driven Systems (ADS)*, Diploma Thesis, FZK (IKET), KALLA, April 2003.

38. Semenchenko V.K. *Surface Phenomena in Metals and Alloys*. Moscow. State Publishing House of Technical and Theoretical Literature, 1957, 491 p. (in Russian).
39. Stremousov V.I.; Solomin B.A. Speed of Sound in the Triple Liquid-Metal System Bi-Pb-Sn. *Zhurnal Fizicheskoy Khimii*. 1975, v. 49, iss. 8, pp. 1972-1974 (in Russian).
40. Kazys R., Voleisis A., Sliteris R. Voleishiene B., Mazheika L., Kupschus P. Development of Ultrasonic Sensors for Operation in a Heavy Liquid Metal. *IEEE Sensors Journal*. 2006, v. 6, iss. 5, pp. 1134- 1143. DOI: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2006.877997>.
41. Hirabayashi M., Ara K., Kondo M., Takahashi, M. Development of ultrasonic flow meter for liquid lead-bismuth flow. *Proc. of the XIII-th Int. Conf. on Nuclear Engineering, Beijing, China, May 16-20, 2005*. ICONE13-50346. Available at: [https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=author:"Kondo,M."](https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=author:) (accessed Oct 10, 2019).
42. GSSSD 236-2009. Tables of Standard Reference Data. Speed of Sound in Liquid Lead, Bismuth and their Eutectic Alloy in the Range From Melting Temperatures up to 1300 K. Moscow. FGUP «STANDARTINFOTM» Publ., 2009, 32 p. (in Russian).
43. Popel' P.S., Yagodin D.A., Mozgovoy A.G., Pokrasin M.A. An Experimental Study of the Speed of Sound in Molten Lead, Bismuth, and their Mutual Eutectic Alloy at High Temperatures. *Teplofizika Vysokikh Temperatur*. 2010, v. 48, iss. 2, pp. 198-205. Available at: <https://gsssd-rosatom.mephi.ru/biblio-pdf/003/pdf/> (accessed Oct 10, 2019). DOI: <https://doi.org/10.1134/S0018151X10020070> (in Russian).

Authors

Chusov Igor Aleksandrovich, Professor, Dr. Sci. (Engineering)

E-mail: igrch@mail.ru

Pronyaev Vladimir Grigorievich, Leading Researcher, Cand. Sci. (Phys.-Math)

E-mail: vgpronyaev@yandex.ru

Novikov Grigory Evgenievich, Chief Specialist, Technical Regulation Department, Rosatom State Corporation

E-mail: genovikov@rosatom.ru

Obysov Nikolay Altksandrovich, Chief Metrologist of Rosatom State Corporation

E-mail: info@rosatom.ru