ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ СВИНЦА

Н.В. Козырев

Институт проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук (ИПХЭТ СО РАН), г. Бийск

Высокотемпературное уравнение состояния (УС) твердого свинца с гранецентрированной кубической структурой решетки получено с использованием экспериментальных данных по термодинамическим свойствам, термическому расширению, сжимаемости, температурной зависимости модуля объемного сжатия. Весь объем экспериментальных данных оптимизирован с использованием температурно-зависимого УС Тайта в диапазоне давлений 0-130 кбар. Температурная зависимость термодинамических и термофизических параметров описана с использованием расширенной модели Эйнштейна. Полученное УС хорошо описывает весь объем экспериментальных данных в пределах погрешностей измерения отдельных величин.

Ключевые слова: свинец, термодинамические свойства, уравнение состояния, оптимизация параметров.

ВВЕДЕНИЕ

При нормальном давлении свинец имеет гранецентрированную кубическую структуру решетки (ГЦК), которая стабильна вплоть до температуры плавления [1]. При повышении давления ГЦК структура при 13 ± 1 ГПа трансформируется в гексагональную, плотноупакованную фазу, которая устойчива до давления 111 ГПа, после чего происходит переход в объемно-центрированную кубическую модификацию [2]. Термодинамические и термофизические свойства свинца являются предметом многочисленных экспериментальных и теоретических исследований. Доступные экспериментальные данные состоят в измерениях энтальпии, теплоемкости, сжимаемости, термического расширения, адиабатического модуля объемного сжатия. В настоящее время достаточно подробно исследованы только свойства свинца с ГЦК структурой решетки. Для других фазовых модификаций свинца измерена только сжимаемость при комнатной температуре. Однако, несмотря на значительный объем экспериментальных данных, для ГЦК-Pb не существует достаточно точного уравнения состояния. Предложенные уравнения состояния [3, 4] весьма упрощенно и неточно описывают различные свойства свинца, и охватывают диапазон температур от комнатной до температуры плавления.

В связи с этим, цель настоящей работы провести взаимосогласованное описание термодинамических и термофизических свойств ГЦК-фазы свинца на основе существующих экспериментальных данных и построить на этой основе широкодиапазонное уравнение состояния.

1. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Определение параметров уравнения состояния свинца проведено по модели, использованной в статье [5] для нахождения уравнения состояния меди. Оптимизированные значения всех параметров определены аналогично с использованием симплексного метода мультиразмерной минимизации.

2. ИЗБРАННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

2.1. Термодинамические свойства

Термодинамические свойства свинца рассмотрены в нескольких справочных изданиях и обзорных статьях (табл. 1). Значения изобарной теплоемкости (C_p), приведенные в различных источниках, в диапазоне до 300 К хорошо согласуются между собой. При более высоких температурах разница возрастает, достигая 2,3 % при температуре плавления (T_m). Следует отметить, что данные работ [7] и [9] практически совпадают (максимальная разница составляет менее 0,02 %). Наиболее полный и подробный обзор и анализ литературных данных по термодинамическим свойствам свинца выполнен в статье [11], которая принята за основу в данной работе.

Табл. 1. Справочные и обзорные источники данных по теплоемкости свинца (C_p – Дж·моль⁻¹·К⁻¹)

ΔT , К	$C_p(298,15)$	$C_p(T_m)$	Ссылка
10-600	26,61	29,37	[6] (Gray, 1972)
100-600,65	26,650	29,742	[7] (Glushko, 1979)
298-601	26,652	29,414	[8] (Pankratz, 1984)
298,15-600,6	26,65	29,74	[9] (Robie, 1995)
0-600,600	26,836	29,414	[10] (Chase, 1998)
0,5-600,612	26,492	30,062	[11] (Arblaster, 2012)

2.2. Термofизические свойства

При построении уравнения состояния свинца использованы экспериментальные данные по термическому расширению, изотермической сжимаемости при нескольких температурах и адиабатическому модулю объемного сжатия.

2.2.1 Мольный объем

В связи с тем, что в некоторых статьях приводятся не абсолютные значения длины (параметра решетки) или объема образца, а относительные, необходимо установить реперное значение мольного объема меди при стандартной температуре. В данной статье в качестве реперного принято значение мольного объема, рассчитанное в работе [12] на основе критического анализа 14 экспериментальных измерений из различных источников: $18,258 \pm 0,009$ см³/моль (плотность 11,348 г/см³) при 293,15 К.

2.2.2. Изотермическая сжимаемость

Изотермическая сжимаемость свинца исследована в ряде работ [6], [13-22]. В большинстве работ измерения проведены при комнатной температуре и только в двух статьях исследована сжимаемость свинца при других температурах: 293 и 396 К (0-30 кбар) [15]; 298 (0,3-87,4 кбар) и 80 К (0,6-89 кбар) [22].

3.2.3. Термическое расширение

Данные по термическому расширению твердого свинца приведены в справочных изданиях [6, 23, 24]. Исчерпывающий обзор и анализ литературных данных по термическому расширению свинца выполнен в обзоре [12]. В настоящей работе использованы экспериментальные данные статей [25-34]. Результаты измерений, приведенные в статье [35], не учитывались, ввиду значительного отличия от данных других авторов. Возможно, это связано с низкой начальной плотностью свинца 11,2566 г/см³ при 293 К.

2.2.4 Модуль объемного сжатия

Адиабатического модуль объемного сжатия твердого свинца рассчитан на основе измерений, приведенных в статьях [36-38], в которых измерены константы эластичности свинца в диапазоне температур 3,2-300 К [36]; 300-600 К [38], при температурах 195 и 296 К [37].

4. Результаты

Параметры, полученные в результате оптимизации для ГЦК-фазы твердого свинца, представлены в таблице 2.

Табл. 2. Суммирование оптимизированных параметров уравнения состояния свинца.

Уравнение, параметр		Значение
Термодинамические функции (1) - (3)	Y_1 , Дж·моль ⁻¹ ·К ⁻¹	0,602995
	Y_2 , Дж·моль ⁻¹ ·К ⁻¹	9,33655
	Y_3 , Дж·моль ⁻¹ ·К ⁻¹	15,1398
	θ_1 , К	62,3560
	θ_2 , К	165,4222
	θ_3 , К	289,9588
	ΔS_0 , Дж·моль ⁻¹ ·К ⁻¹	0,01241
	h , Дж·моль ⁻¹ ·К ^{-m}	$6,10330 \cdot 10^{-5}$
	m	2,48410
Уравнение состояния (4)	n_0	5,2301
Модуль объемного сжатия (7)	B_0 , кбар	1449,8
	B_1 , К ⁻¹	$2,4591 \cdot 10^{-4}$
	B_2 , К ⁻²	$1,2200 \cdot 10^{-7}$
Термическое расширение (5), (6)	V_0 , см ³ /моль	7,0418
	X_1	$8,7245 \cdot 10^{-7}$
	X_2	$1,3682 \cdot 10^{-5}$
	X_3	$3,4445 \cdot 10^{-5}$
	Θ_1 , К	68,8306
	Θ_2 , К	158,176
	Θ_3 , К	278,341
	g , К ^{-k}	$1,0752 \cdot 10^{-9}$
	k	2,28213

Примечание: номера уравнений соответствуют статье [5].

Сравнение с экспериментальными данными приведено на рисунках 1-5.

На рис. 1 приведена расчетная теплоемкость свинца в сравнении с данными других источников. Полученная в настоящей работе зависимость хорошо аппроксимирует данные статьи [11]. Среднее относительное среднеквадратичное отклонение расчетных и экспериментальных данных (RMS) в диапазоне температур 5-600,612 К составило 1,38 %. При этом наибольшее отклонение имеют данные при температурах ниже 100 К. В области температур выше 100 К RMS=0,26 %. Для энтальпии отклонения существенно ниже: RMS=0,52 % для всего диапазона температур и 0,08 % при $T > 100$ К.

Рис.1. Зависимость теплоемкости свинца от температуры

На рис. 2 и 3 показаны зависимости молярного объема и коэффициента объемного термического расширения (КТР) свинца от температуры. Общее число экспериментальных точек составляло 229 для молярного объема и 115 для КТР. Для молярного объема среднее абсолютное отклонение расчета от эксперимента составило $0,0018 \text{ см}^3/\text{моль}$; $\text{RMS}=0,014 \%$. Расчетное значение молярного объема свинца при $298,15 \text{ K}$ равно $18,267 \text{ см}^3/\text{моль}$, что хорошо согласуется с опорным значением. Для КТР отклонения значительно выше, что обусловлено более высокими погрешностями измерения этого показателя: RMS возрастает на два порядка до $1,30 \%$.

Рис.2. Зависимость молярного объема свинца от температуры

Рис.3. Зависимость объемного коэффициента термического расширения свинца от температуры

На рисунке 4 представлены зависимости молярного объема свинца от давления при температурах 80, 298, 396 К. Для молярного объема полученные значения среднего абсолютного отклонения расчета от эксперимента составили (в скобках приведен RMS):

при 80 К 0,020 см³/моль (0,16 %); при 298,15 К 0,014 см³/моль (0,10 %); при 396 К 0,25 см³/моль (0,17 %). В таблице 3 проведено сравнение полученных в данной работе параметров уравнения состояния с литературными данными (B_0 , n_0 – модуль объемного сжатия и его производная по давлению).

Рис. 4. Зависимость мольного объема свинца от давления при разных температурах

Табл. 3. Параметры уравнений состояния ГЦК-фазы свинца

V_0^{*1} , cm ³ /mol	B_0^{*1} , kbar	n_0	УС ^{*2}	Ссылка
18.256	399.82	6.76	Mur	[16] (Vaidya, 1970)
–	431	4.6(3)	Mur	[17] (Mao, 1977)
18.271	399	6.13(10)	Vinet	[18] (Mao, 1990)
18.263	432.0	4.87	BM3	[19] (Vohra, 1990)
18.265	420	6.1	H11	[20] (Schulte, 1995)
	480	4±1	H12	
18.251	405	5.74	BM3	[21] (Kuznetsov, 2002)
18.2748	410,1	5.72	BM3	[22] (Strassle, 2014)
	412,5	5.72	Vinet	
	411.3	5.72	HoAp1	
18.267	417.5	5.25	Tait	Данная работа

*1 при 298 К

*2 Mur – Murnaghan; Vinet – Vinet; BM3 – УС 3-го порядка Birch-Murnaghan; H11, H12, HoAp1 – модификации УС Holzapfel.

На рис. 5 представлены зависимости модуля объемного сжатия свинца от температуры. Полученная в данной работе зависимость хорошо воспроизводит экспериментальные данные (RMS=0,31 %) и согласуется с изотермическим модулем объемного сжатия, представленным в статье [39].

Рис.5. Зависимость адиабатического (B_s) и изотермического (B_T) модуля объемного сжатия свинца от температуры

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты, представленные в данной работе, показывают, что использованная модель позволяет описать доступные экспериментальные данные для ГЦК-фазы свинца в широком диапазоне давлений и температур в пределах экспериментальной погрешности измерений. При этом все термодинамические и термофизические параметры свинца взаимосогласованы до давлений 130 кбар в диапазоне температур 5-600,612 К.

Работа выполнена в рамках проекта по бюджетному финансированию № 0308-2021-0005.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Зиновьев, В.Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах [Текст] / В.Е. Зиновьев. – Справочное издание. – М.: Металлургия, 1989.
2. McMahon, M.I. High-pressure structures and phase transformations in elemental metals / M.I. McMahon, R.J. Nelmes // Chem. Soc. Rev. – 2006. – Vol. 35, No.10. – Pp. 943-963.
3. Fortes, A.D. The high-pressure phase diagram of ammonia dehydrate / A.D. Fortes [et al.] // High Pressure Res. – 2007. – Vol. 27, No.2. – Pp. 201-212.
4. Yue, P. Only numerical modeling of detonation properties for some metal azides / P. Yue, X. Long, X. Jiang, Z. Zhang // Propell. Explos. Pyrot. – 2020. – Vol. 45, No.4. – Pp. 600-606.

5. Козырев, Н.В. Термодинамические свойства и уравнение состояния меди / Н.В. Козырев // Ползуновский вестник. – 2021. – Вып. 4. С.
6. Gray, D.E. American Institute of Physics Handbook. 3-rd ed. / D.E. Gray – N.-Y.: McGraw-Hill. 1972.
7. Глушко, В.П. Термодинамические свойства индивидуальных веществ [Текст] / В.П. Глушко. – Справочное издание. – 3-е изд. – М.: Наука. – Т. II. – Кн. 2, 1979.
8. Pankratz, L.B., Stuve J.M., Gokcen N.A. Thermodynamic data for mineral technology // Bulletin No. 677. US Bureau of Mines. Washington, D.C. USA. 1984.
9. Robie, R.A., Hemingway B.S. Thermodynamic properties of minerals and related substances at 298.15 K and 1 bar (10^5 pascals) pressure and at higher temperatures // U.S. Geological Survey Bulletin 2131. United States Government Printing Office. Washington: 1995.
10. Chase, M.W. NIST-JANAF Thermochemical Tables. 4-th ed. // J. Phys. Chem. Ref. Data. Monograph 9. – 1998. – Pp. 1-1951.
11. Arblaster, J.W. Thermodynamic properties of lead / J.W. Arblaster // Calphad. – 2012. – Vol. 39. – Pp. 47-53.
12. Arblaster, J.W. Selected values of the crystallographic properties of the elements / J.W. Arblaster – ASM International. 2018.
13. Bridgman, P.W. The compression of twenty-one halogen compounds and eleven other simple substances to 100,000 kg/cm² / P.W. Bridgman // Proceedings of the American Academy of Arts and Sciences. – 1945. – Vol. 76, No.1. – Pp. 1-7.
14. Bridgman, P.W. The compression of sixty-one solid substances to 25,000 kg/cm², determined by a new rapid method / P.W. Bridgman // Proceedings of the American Academy of Arts and Sciences. – 1945. – Vol. 76, No.1. – Pp. 9-24.
15. Генштафт, Ю.С. Определение параметров состояния твердых тел при высоких давлениях методом смещения поршня / Ю.С. Генштафт, Л.Д. Лившиц, Ю.Н. Рябинин // Прикладная механика и техническая физика. – 1962. – №5. – С. 107-116.
16. Vaidya, S.N. Compressibility of 18 metals to 45 kbar / S.N. Vaidya, G.C. Kennedy // J. Phys. Chem. of Solids. – 1970. – Vol. 31, No.10. – Pp. 2329-2345.
17. Mao, H.K. Study of lead at high pressure: compressibility and fixed-point transition between the FCC and HCP polymorphs under various degrees of nonhydrostatic stress / H.K., Mao, P.M. Bell // Carnegie Inst. Washington. Year Book 77. – 1977-1978. – Pp. 842-848.
18. Mao, H.K. High-pressure phase transition and equation of state of lead to 238 GPa / H.K. Mao, [et al.] // Solid State Commun. – 1990. – Vol. 74, No.9. – Pp. 1027-1029.
19. Vohra, Y.K. Static compression of metals Mo, Pb, and Pt to 272 GPa: Comparison with shock data / Y.K. Vohra, A.L. Ruoff // Phys. Rev. B. – 1990. – Vol. 42, No.13. – Pp. 8651-8654.
20. Schulte, O. Equation-of-state behavior for different phases of lead under strong compression / O. Schulte, W.B. Holzapfel // Phys. Rev. B. 1995. – Vol. 52, No.17. – Pp. 12636-12639.
21. Kuznetsov, A. FCC-HCP phase boundary in lead / A. Kuznetsov [et al.] // Solid State Commun. 2002. – Vol. 122, No.3-4. – Pp. 125-127.
22. Strassle, T. Equation of state of lead from high-pressure neutron diffraction up to 8.9 GPa and its implication for the NaCl pressure scale / T. Strassle [et al.] // Phys. Rev. B. – 2014. – Vol. 90, No.1. – Pp. 014101.1-8.
23. Новикова, С.И. Тепловое расширение твердых тел [Текст] / С.И. Новикова – М.: Наука, 1974.
24. Touloukian, Y.S. Thermophysical Properties of Matter. The TPRC Data Series. Vol.12. Thermal Expansion Metallic Elements and Alloys / Y.S. Touloukian, R.K. Kirby, R.E. Taylor, P.D. Desai – IFI/Plenum. New York, N.Y. USA. 1975.
25. Stokes, A.R. The thermal expansion of lead from 0 °C to 320 °C / A.R. Stokes, A.J.C. Wilson // Proc. Phys. Soc. – 1941. – Vol. 53, No.6. – Pp. 658-662.
26. Nix, F.C. The thermal expansion of pure metals. II: Molybdenum, palladium, silver, tantalum, tungsten, platinum, and lead / F.C. Nix, D. MacNair // Phys. Rev. – 1942. – Vol. 6, No.1-2. – Pp. 74-78.
27. Feder, R. Use of thermal expansion measurements to detect lattice vacancies near the melting point of pure lead and aluminum / R. Feder, A.S. Nowick // Phys. Rev. – 1958. – Vol. 109, No.6. – Pp. 1959-1963.
28. Rubin, T. The thermal expansion of lead / T. Rubin, L. Johnston, H.W. Altman // The Journal of Physical Chemistry. – 1962. – Vol. 66, No.2. – Pp 266-268.
29. White, G.K. Thermal expansion at low temperatures IV. Normal and superconducting lead / G.K. White // Philos. Mag. – 1962. – Vol.7, No.74. – Pp. 271-278.
30. d'Heurle, F.M. Equilibrium concentration of lattice vacancies in lead and lead alloys / F.M., d'Heurle, R. Feder, A.S. Nowick // J. Phys. Soc. Japan. – 1963. – Vol. 18. Suppl. II. – Pp. 184-90.
31. Channing, D.A. Thermal expansion of lead at low temperatures / D.A. Channing, S. Weintraub // Can. J. Phys. – 1965. – Vol. 43, No.5. – Pp. 955-959.
32. Feder, R. Equilibrium vacancy concentration in pure Pb and dilute Pb-Tl and Pb-In alloys / R. Feder, A.S. Nowick // Philos. Mag. – 1967. – Vol. 15, No.136. – Pp. 805-812.
33. Хайрулин, Р.А. Термические свойства свинца и алюминия в твердом и жидком состояниях [Текст] / Р.А., Хайрулин, С.В. Станкус // В сб.: Теплофизические свойства растворов, расплавов и композитов. – Новосибирск: Ин-т теплофизики СО АН СССР. – 1992. – С. 13-24.
34. Stankus, S.V. The density of alloys of tin-lead system in the solid and liquid states / S.V. Stankus, R.A. Khairulin // High Temp. – 2006. – Vol. 44, No.3. – Pp. 389-395.
35. Станкус, С.В. Плотность свинца в твердой и жидкой фазах при температурах 300-1800 К / С.В. Станкус, [и др.] // Перспективные материалы. – 2004. – №6. – С. 30-35.
36. Waldorf, D.L. Low-temperature elastic moduli of lead / D.L. Waldorf, G.A. Alers // J. Appl. Phys. – 1962. – Vol. 33, No.11. – Pp. 3266-3269.
37. Miller, R.A., The pressure derivatives of the elastic constants of lead / R.A. Miller, D.E. Schuele // J. Phys. Chem. of Solids. – 1969. – Vol. 30, No. 3. – Pp. 589-600.
38. Vold, C.L. The elastic constants for single-crystal lead and indium from room temperature to the melting point / C.L. Vold [et al.] // J. Phys. Chem. of Solids. – 1977. – Vol. 38, No.2. – Pp. 157-160.
39. Cordoba, G. The heat capacity of lead from 300 to 850 K. Conversion of C_p to C_v for solid lead / G. Cordoba, C.R. Brooks // Phys. Status Solidi A. – 1972. – Vol.11, No.2. – Pp. 749-754.

Козырев Николай Владимирович – д.т.н., заведующий лабораторией физико-химических основ создания энергетических конденсированных систем, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук (ИПХЭТ СО РАН), тел.: (3854)305805, e-mail: kozyrev@ipcet.ru.

THERMODYNAMIC PROPERTIES AND THE EQUATION OF STATE OF LEAD

N.V. Kozyrev

Institute for Problems of Chemical and Energetic Technologies of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (IPCET SB RAS), Biysk

Abstract – The high-temperature equation of state (US) of solid lead with a face-centered cubic lattice structure is obtained using experimental data on thermodynamic properties, thermal expansion, compressibility, and temperature dependence of the volume compression modulus. The entire volume of experimental data is optimized using a temperature-dependent Void in the pressure range 0-130 kbar. The temperature dependence of thermodynamic and thermophysical parameters is described using the extended Einstein model. The obtained US well describes the entire volume of experimental data within the measurement errors of individual quantities.

Keywords: lead, thermodynamic properties, equation of state, optimization of parameters.

REFERENCES

1. Zinoviev, V.E. Thermophysical properties of metals at high temperatures [Text] / V.E. Zinoviev. Reference book. – M.: Metallurgiya, 1989.
2. McMahon, M. I. structure of high pressure phase transitions in elemental metals/ M. I. McMahon, R. J. Nelmes// Chem. SOC. ed. – 2006. – Volume 35, No. 10. – Pp. 943-963.
3. Fortes, A. D. Phase diagram of dehydrate ammonia under high pressure / A. D. Fortes [et al.]// a Study of high-pressure – 2007. – Volume 27, No. 2. – P. 201-212.
4. Yue, P. Only numerical modeling of detonation properties of some metal azides / P.Yue, H.Long, H.Jiang, Z.Zhang// Fuel. Explodes. Pirot. - 2020. - Volume 45, No. 4. - pp. 600-606.
5. Kozyrev, N.V. Thermodynamic properties and the equation of state of copper / N.V. Kozyrev // Polzunovsky vestnik – 2021. - Issue 4. P.
6. Gray, D.E. Handbook of the American Institute of Physics. 3rd ed./ D. E. Gray - N.-Ya.: McGraw-Hill, 1972.
7. Glushko, V.P. Thermodynamic properties of individual substances [Text] / V.P. Glushko. - Reference edition. - 3rd ed. - M.: Nauka. - Vol. II. - Book 2, 1979.
8. Pankrats L.B., Stuve J.M., Gokchen N.A. Thermodynamic data for mineral technology// Bulletin No. 677. US Bureau of Mines. Washington, DC, USA, 1984.
9. Robi R.A., Hemingway B.S. Thermodynamic properties of minerals and related substances at 298.15 K and a pressure of 1 bar (105 pascal) and at higher temperatures // Bulletin of the US Geological Survey 2131. United States Government Printing Office. Washington, 1995.
10. Chase, M. V. Thermochemical tables of NIST-JANAF. 4th ed./ J. Phys. Chem.Ref.Data. Monograph 9. - 1998. - p.1-1951.
11. Arblaster, J.U. Thermodynamic properties of lead / J.U. Arblaster// Calphad. - 2012. - Vol. 39. - pp. 47-53.
12. Abluster, J.U. Selected values of crystallographic properties of elements / J.U. Abluster - ASM International. 2018.
13. Bridgman, P.U. Compression of twenty-one halogen compounds and eleven other simple substances to 100,000 kg/cm/ P.U.Bridgman// Proceedings of the American Academy of Arts and Sciences. - 1945. - Volume 76, No. 1. - pp. 1-7.
14. Bridgman, P.U. Compression of sixty-one solids to 25,000 kg/cm2, determined by a new fast method/ P.W.Bridgman// Proceedings of the American Academy of Arts and Sciences. - 1945. - Volume 76, No. 1. - pp.9-24.
15. Genschaf, Y.S. Determination of parameters of the state of solids at high pressures by the piston displacement method / Yu.S. Genschaf, L.D. Livshits, Yu.N. Ryabinin // Applied Mechanics and technical Physics. - 1962. - No.5. - pp. 107-116.
16. Vaidya, S.N. Compressibility of 18 metals to 45 kbar / S.N. Vaidya, G.K. Kennedy// J. Phys. Chemistry of solids. - 1970. - Volume 31, No. 10. - pp. 2329-2345.
17. Mao, H.K. Investigation of lead at high pressure: compressibility and fixed-point transition between FCC and HCP polymorphs at various degrees of non-hydrostatic stress/ H.K., Mao, P.M. Bell// Carnegie Institute. Washington. Yearbook 77. - 1977-1978. - pp.842-848.
18. Mao, H.K. Phase transition under high pressure and the equation of state of lead up to 238 GPa / H.K. Mao, [et al.]// Solid-state community. - 1990. - Volume 74, No. 9. - pp. 1027-1029.
19. Vohra, Y. K. a Static compression of metals Mo, Pb and Pt up to 272 GPa: comparison with shock data / Y. K. Vohra, and A. L. Ruoff// Physics. Ed. B. – 1990. – Volume 42, No. 13. – S. 8651-8654.
20. Schulte, O. the Equation of state behavior for different phases of lead with a strong grip / O. Schulte, W. B. Holzapfel// Physics. Ed. B. 1995. – Volume 52, No. 17. – S. 12636-12639.
21. Kuznetsov, A. interphase Boundary FCC-HCP lead / A. Kuznetsov [et al.]// Community solids.2002. – Vol. 122, No. 3-4. – P. 125-127.
22. Strassl, T Equation of state of lead in neutron diffraction high pressure up to 8.9 GPa and its implications for scale pressure NaCl / T Strassl [et al.]// Phys.ed.B. – 2014. – Volume 90, No. 1. – P. 014101.1-8.
23. Novikova, S. I. Thermal expansion of solids [Text] / S. I. Novikova, M.: Nauka, 1974.
24. Touloukian, Y. S., Thermophysical properties of matter. TPRC Data Series. Volume 12. Metal elements and alloys with thermal expansion / Y.S. Tulukyan, R. K. Kirby, R. E.Taylor, P.D. Desai - IFI/Plenum. New York, New York, USA, 1975.
25. Stokes, A.R. Thermal expansion of lead from 0 °C to 320 °C / A. R. Stokes, A.J. S. Wilson// Tr. Phys.soc. - 1941. - Volume 53, No. 6. - pp. 658-662.
26. Nicks, F.S. Thermal expansion of pure metals. II: Molybdenum, palladium, silver, tantalum, tungsten, platinum, and lead / F. C. nix, D. McNair Fiz.ed. – 1942. – Volume 6, No. 1-2. – P. 74-78.
27. Feder, R. the Use of measurements of thermal expansion for the detection of vacancies in the lattice near the melting point of pure lead and aluminum / R. Feder, A. S. Novik// Phys. ed. – 1958. – Vol. 109, No. 6. – S. 1959-1963.
28. Rubin, T. Thermal expansion of lead / T. Rubin, L. Johnston, H. W. Altman// Journal of Physical Chemistry. - 1962. - Volume 66, No. 2. - pp. 266-268.

29. White, G.K. Thermal expansion at low temperatures IV. Normal and superconducting lead / G.K. White// Philos. Mag. - 1962. - Volume 7, No. 74. - pp. 271-278.
30. d'Erle, F.M. Equilibrium concentration of lattice vacancies in lead and lead alloys/ F.M.d'Erle, R. Feder, A.S. Novik// J. Phys. Soc. Japan. - 1963. - Volume 18, Supplement II. - pp.184-90.
31. Channing, D.A. Thermal expansion of lead at low temperatures/ D.A. Channing, S. Weintraub// Kan.J. Physics. - 1965. - Volume 43, No. 5. - pp. 955-959.
32. Feder, R. Equilibrium concentration of vacancies in pure Pb and dilute Pb-Tl and Pb-In alloys / R. Feder, A. S. Novik// Philos. Mag. - 1967. - Volume 15, No. 136. - pp.805-812.
33. Khairulin, R.A. Thermal properties of lead and aluminum in solid and liquid states [Text] / R.A., Khairulin, S.V. Stankus // In the collection: Thermophysical properties of solutions, melts and composites. - Novosibirsk: Institute of Thermophysics SB of the USSR Academy of Sciences. - 1992. - pp. 13-24.
34. Stankus, S.V. Density of tin-lead system alloys in solid and liquid states / S.V.Stankus, R.A.Khairulin// High temperatures. - 2006. - Volume 44, No. 3. - pp. 389-395.
35. Stankus, S.V. Density of lead in solid and liquid phases at temperatures of 300-1800 K / S.V. Stankus, [et al.] // Perspective materials. - 2004. - No.6. - pp. 30-35.
36. Waldorf, D.L. Low-temperature elastic modules of lead/ D.L. Waldorf, G.A. Ahlers// J. Appendix. Physics. - 1962. - Volume 33, No. 11. - pp. 3266-3269.
37. Miller, R. A. Pressure derivatives from elastic constants of lead / R. A. Miller, D. E. Schuele// J. Phys. Chemistry of solids. - 1969. - Volume 30, No. 3. - pp. 589-600.
38. Wold, S.L. Elastic constants for monocrystalline lead and indium from room temperature to melting point / S.L. Wold [et al.]// J. Phys. Chemistry of solids. - 1977. - Volume 38, No. 2. - pp.157-160.
39. Cordoba, G. Heat capacity of lead from 300 to 850 K. Conversion of CP to CV for solid lead / G. Cordoba, K. R. Brooks// Physics. Status of Solidi A. - 1972. - Volume 11, No. 2. - pp.749-754.

Kozyrev Nikolai Vladimirovich – Head of Laboratory of Physicochemical Bases of Energetic Condensed Systems, Dr. (Engin.), Institute for Problems of Chemical and Energetic Technologies of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (IPCET SB RAS), tel.: (3854)305805, e-mail: kozyrev@ipcet.ru.