

EDN: JZWQPX

УДК 536.63

## Thermodynamic Properties of Compounds Formed in SrO-Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, and PbO-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Systems

Lyubov T. Denisova\*,  
Natalia V. Belousova and Viktor M. Denisov  
*Siberian Federal University  
Krasnoyarsk, Russian Federation*

Received 09.01.2023, received in revised form 05.05.2023, accepted 30.06.2023

**Abstract.** A linear correlation has been established between the standard values of the enthalpies  $\Delta_f H_{298}^{\circ}$  and the entropies  $S_{298}^{\circ}$  of formation, the heat capacity  $C_{p,298}^{\circ}$ , and the composition of oxide compounds formed in the SrO-Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, and PbO-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> systems. The heat capacity  $C_{p,298}^{\circ}$  of oxides of the SrO-Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> system was calculated using the Neumann-Kopp empirical relations, the Kumok incremental method, the Kellogg model and group contributions. It is found that the best agreement with the available experimental results is given by the Kumok method.

**Keywords:** thermodynamic properties, heat capacity, oxides of strontium, bismuth, lead, and iron.

Citation: Denisova L. T., Belousova N. V., Denisov V. M. Thermodynamic properties of compounds formed in SrO-Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, and PbO-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> systems. J. Sib. Fed. Univ. Chem., 2023, 16(3), 417–425. EDN: JZWQPX



## Термодинамические свойства соединений, образующихся в системах SrO-Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и PbO-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Л. Т. Денисова, Н. В. Белоусова, В. М. Денисов  
*Сибирский федеральный университет  
Российская Федерация, Красноярск*

**Аннотация.** Установлена линейная корреляция между стандартными значениями энтальпий  $\Delta_f H_{298}^{\circ}$ , энтропий  $S_{298}^{\circ}$  образования, теплоемкости  $C_{p,298}^{\circ}$  и составом образующихся оксидных

© Siberian Federal University. All rights reserved

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

\* Corresponding author E-mail address: ldenisova@sfu-kras.ru

соединений в системах  $\text{SrO-Bi}_2\text{O}_3$ ,  $\text{V}_2\text{O}_5\text{-Bi}_2\text{O}_3$  и  $\text{PbO-Fe}_2\text{O}_3$ . Рассчитана теплоемкость  $C_{p,298}^0$  оксидов системы  $\text{SrO-Bi}_2\text{O}_3$  эмпирическими соотношениями Неймана-Коппа, инкрементным методом Кумока, Келлога и групповых вкладов. Найдено, что лучшее согласие с имеющимися экспериментальными результатами дает инкрементный метод Кумока.

**Ключевые слова:** термодинамические свойства, теплоемкость, оксиды стронция, висмута, свинца и железа.

Цитирование: Денисова Л. Т., Белоусова Н. В., Денисов В. М. Термодинамические свойства соединений, образующихся в системах  $\text{SrO-Bi}_2\text{O}_3$ ,  $\text{V}_2\text{O}_5\text{-Bi}_2\text{O}_3$  и  $\text{PbO-Fe}_2\text{O}_3$ . Журн. Сиб. федер. ун-та. Химия, 2023, 16(3). С. 417–425. EDN: JZWPQX

### Введение

Сложные оксидные соединения привлекают к себе внимание возможностями их практического применения в различных областях техники и науки. Так, например, оксидные соединения, образующиеся в системе  $\text{SrO-Bi}_2\text{O}_3$ , используются в качестве фотокатализаторов в процессах очистки воздуха и воды [1–10]. Соединения этой системы представляют определенный интерес в связи с проблемами синтеза керамических сверхпроводников в системах  $\text{Sr-Bi-O}$  [11, 12] и  $\text{Bi-Sr-Ca-Cu-O}$  [13–15].

Соединения системы  $\text{V}_2\text{O}_5\text{-Bi}_2\text{O}_3$  нашли применение в качестве катализаторов, фотокатализаторов, пигментов, диэлектриков, оксидных ионных проводников и др. [16–23].

Интерес к системе  $\text{PbO-Bi}_2\text{O}_3$  обусловлен возможностями получения гексаферрита бария  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ , твердых растворов на его основе и  $\text{PbFe}_{12}\text{O}_{19}$  из расплава на основе  $\text{PbO}$  [24–27].

Диаграмму состояния  $\text{SrO-Bi}_2\text{O}_3$  исследовали разные авторы. Эти данные приведены в работах [28–30]. Из них следует, что полученные результаты различаются как по количеству образующихся соединений, так и по температурам их плавления. Данный факт может быть обусловлен следующими обстоятельствами. Во-первых, согласно [30], вид диаграммы состояния, а также составы образующихся соединений зависят от парциального давления кислорода (в [28, 29] исследования проведены на воздухе). При этом возможно образование  $\text{Sr}_6\text{Bi}_4\text{O}_{15}$ ,  $\text{Sr}_6\text{Bi}_2\text{O}_{11}$  и  $\text{Sr}_{24}\text{Bi}_{14}\text{O}_{52}$ , наличие которых в [28, 29] не отмечено. Во-вторых, имеет место образование метастабильных фаз [31]. Есть мнение [11], что в системе  $\text{SrO-Bi}_2\text{O}_3$  существуют или могут существовать следующие оксидные соединения:  $\text{Sr}_6\text{Bi}_2\text{O}_9$ ,  $\text{Sr}_3\text{Bi}_2\text{O}_6$ ,  $\text{Sr}_2\text{Bi}_2\text{O}_5$ ,  $\text{Sr}_{18}\text{Bi}_{22}\text{O}_{51}$ ,  $\text{Sr}_6\text{Bi}_{14}\text{O}_{27}$ ,  $\text{SrBi}_4\text{O}_7$ ,  $\text{Sr}_2\text{Bi}_6\text{O}_{11}$ ,  $\text{SrBi}_2\text{O}_4$ ,  $\text{Sr}_8\text{Bi}_{10}\text{O}_{23}$ ,  $\text{Sr}_8\text{Bi}_2\text{O}_{11}$ ,  $\text{Sr}_5\text{Bi}_6\text{O}_{14}$ ,  $\text{Sr}_6\text{Bi}_4\text{O}_{15}$ ,  $\text{Sr}_{24}\text{Bi}_{14}\text{O}_{52}$ . Наличие некоторых из них на равновесной диаграмме состояния не зафиксировано [28–30]. Подобное явление было отмечено ранее для диаграмм  $\text{La}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  [32] и  $\text{Nd}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  [33]. Имеющиеся соединения, соответственно  $\text{La}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$  и  $\text{Nd}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ , на них не обнаружены. В аналогичной системе  $\text{Sm}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  соединение  $\text{Sm}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$  существует только при высоких температурах [34].

Авторы работы [35] отметили различие опубликованных данных о фазовых равновесиях в системе  $\text{V}_2\text{O}_5\text{-Bi}_2\text{O}_3$  как по количеству соединений, так и по их составу.

Обзор имеющейся информации по диаграмме состояния системы  $\text{PbO-Fe}_2\text{O}_3$  проведен авторами работы [36]. Здесь же представлены результаты термодинамического моделирования фазовых равновесий в этой системе. Отмечено наличие соединений  $\text{Pb}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$ ,  $\text{PbFe}_4\text{O}_7$  и  $\text{PbFe}_{12}\text{O}_{19}$ .

В то же время в работе [12] приведены термодинамические свойства  $\text{Pb}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$ ,  $\text{PbFe}_4\text{O}_7$ ,  $\text{PbFe}_{12}\text{O}_{19}$ ,  $\text{PbFe}_2\text{O}_4$ ,  $\text{PbFe}_8\text{O}_{17}$ ,  $\text{PbFe}_6\text{O}_{10}$ .

Для компьютерного моделирования систем  $\text{SrO-Bi}_2\text{O}_3$ ,  $\text{V}_2\text{O}_5\text{-Bi}_2\text{O}_3$  и  $\text{PbO-Fe}_2\text{O}_3$  необходимы надежные сведения о термодинамических свойствах образующихся оксидных соединений. Такие результаты для многих из них в литературе отсутствуют. Как правило, термодинамические данные получают экспериментальным путем. Альтернативным источником такой информации служат термодинамическое моделирование [11, 12], расчет с помощью полуэмпирических соотношений [37–41] и аналитические методы [39].

Целью настоящей работы является установление корреляции между термодинамическими свойствами (стандартные энтальпия и энтропия, теплоемкость) с составом оксидных соединений  $\text{SrO-Bi}_2\text{O}_3$ ,  $\text{V}_2\text{O}_5\text{-Bi}_2\text{O}_3$  и  $\text{PbO-Fe}_2\text{O}_3$ .

### Результаты и обсуждение

В работе [42] методом сравнительного расчета были определены термодинамические свойства апатитов, формула которых была представлена в виде  $3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2\text{X}$ , где  $\text{X} = \text{CaF}_2$ ,  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Установлено, что зависимости стандартных энтальпий образования, энергий Гиббса и энтропий апатитов  $3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2\text{X}$  от аналогичных термодинамических функций структурных частей  $\text{X}$  имеют линейный характер. Указано, что при этом строение твердой фазы в расчетах не учитывалось. Следуя авторам работы [42], а также учитывая данные [11, 12, 16], представим соединения, образующиеся в системах  $\text{SrO - Bi}_2\text{O}_3$ ,  $\text{V}_2\text{O}_5 - \text{Bi}_2\text{O}_3$  и  $\text{PbO - Fe}_2\text{O}_3$ , в виде  $n\text{SrO} \cdot \text{Bi}_2\text{O}_3$ ,  $\text{V}_2\text{O}_5 \cdot n\text{Bi}_2\text{O}_3$ ,  $\text{PbO} \cdot n\text{Fe}_2\text{O}_3$ , где  $n$  – число молей. Заметим, что не все оксидные соединения анализируемых систем можно представить в таком виде. Кроме того, как и в работе [42], изменения структуры образующихся соединений при изменении их состава учитывать не будем.

На рис. 1–3 показано влияние состава соединений систем  $\text{SrO - Bi}_2\text{O}_3$ ,  $\text{V}_2\text{O}_5 - \text{Bi}_2\text{O}_3$  и  $\text{PbO - Fe}_2\text{O}_3$  на их термодинамические свойства. Из них видно, что значения стандартных энтальпий  $\Delta_f H_{298}^\circ$ , энтропий  $S_{298}^\circ$  и теплоемкости  $C_{p,298}^\circ$  закономерно увеличиваются по мере роста концентрации второго оксида. Полученные данные могут быть описаны линейными уравнениями:

$$\Delta_f H_{298}^\circ (\text{Bi}_2\text{O}_3 \cdot n\text{SrO}) = - (625.13 \pm 21.93) + (597.50 \pm 5.03) n_{\text{SrO}}, \quad (1)$$

$$S_{298}^\circ (\text{Bi}_2\text{O}_3 \cdot n\text{SrO}) = (150.97 \pm 2.95) + (54.10 \pm 0.68) n_{\text{SrO}}, \quad (2)$$

$$C_{p,298}^\circ (\text{Bi}_2\text{O}_3 \cdot n\text{SrO}) = (110.40 \pm 1.97) + (47.55 \pm 0.45) n_{\text{SrO}}, \quad (3)$$

$$\Delta_f H_{298}^\circ (\text{V}_2\text{O}_5 \cdot n\text{Bi}_2\text{O}_3) = - (1684.3 \pm 74.1) + (597.92 \pm 12.06) n_{\text{Bi}_2\text{O}_3}, \quad (4)$$

$$S_{298}^\circ (\text{V}_2\text{O}_5 \cdot n\text{Bi}_2\text{O}_3) = (143.56 \pm 29.23) + (155.16 \pm 4.76) n_{\text{Bi}_2\text{O}_3}, \quad (5)$$

$$C_{p,298}^\circ (\text{V}_2\text{O}_5 \cdot n\text{Bi}_2\text{O}_3) = (137.82 \pm 6.05) + (113.05 \pm 0.98) n_{\text{Bi}_2\text{O}_3}, \quad (6)$$

$$\Delta_f H_{298}^\circ (\text{PbO} \cdot n\text{Fe}_2\text{O}_3) = - (324.90 \pm 53.74) + (876.1 \pm 16.2) n_{\text{Fe}_2\text{O}_3}, \quad (7)$$

$$S_{298}^\circ (\text{PbO} \cdot n\text{Fe}_2\text{O}_3) = (66.51 \pm 0.01) + (87.40 \pm 0.01) n_{\text{Fe}_2\text{O}_3}, \quad (8)$$

$$C_{p,298}^\circ (\text{PbO} \cdot n\text{Fe}_2\text{O}_3) = (43.64 \pm 2.03) + (109.30 \pm 0.61) n_{\text{Fe}_2\text{O}_3} \quad (9)$$

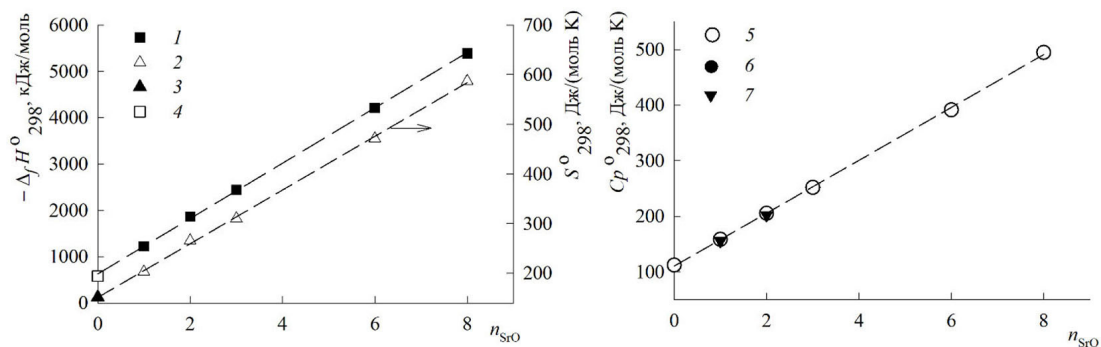


Рис. 1. Корреляция между термодинамическими свойствами и составом образующихся оксидных соединений SrO-Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: 1 – [12], 2 – [12], 3 – [37], 4 – [43], 5 – [12], 6 – [38], 7 – [44]

Fig. 1. Correlation between thermodynamic properties and composition of the oxide compounds formed in the SrO-Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> system: 1 – [12], 2 – [12], 3 – [37], 4 – [43], 5 – [12], 6 – [38], 7 – [44]

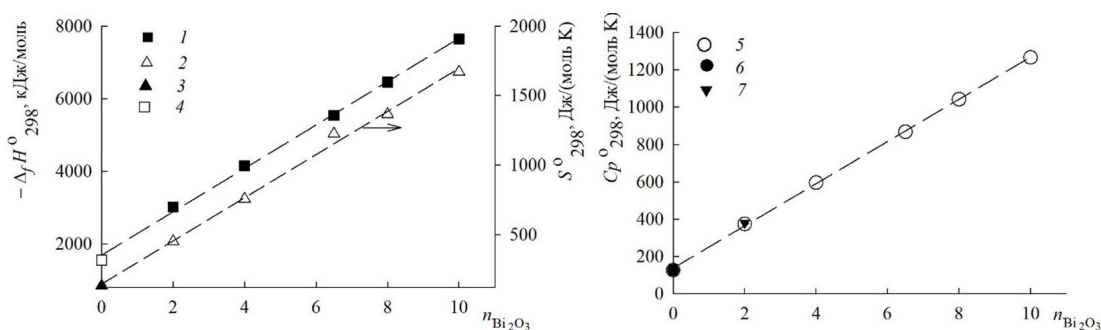


Рис. 2. Влияние состава оксидов системы V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> на их термодинамические свойства: 1 – [12], 2 – [12], 3 – [37], 4 – [37], 5 – [12], 6 – [44], 7 – [35]

Fig. 2. Influence of the composition of oxides in the V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> system on their thermodynamic properties: 1 – [12], 2 – [12], 3 – [37], 4 – [37], 5 – [12], 6 – [44], 7 – [35]

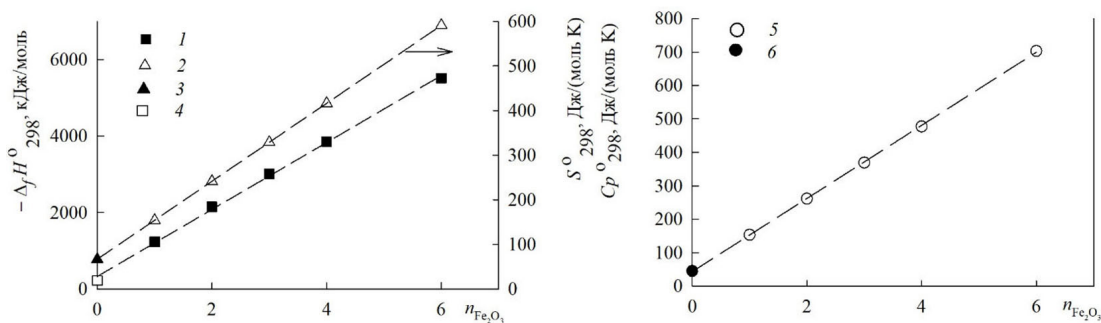


Рис. 3. Связь между составом оксидов системы PbO-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и их термодинамическими свойствами: 1 – [12], 2 – [12], 3 – [37], 4 – [37], 5 – [12], 6 – [44]

Fig. 3. Relation between the composition of oxides formed in the PbO-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> system and their thermodynamic properties: 1 – [12], 2 – [12], 3 – [37], 4 – [37], 5 – [12], 6 – [44]

Коэффициенты корреляции для уравнений (1–9) равны соответственно 0.9999, 0.9997, 0.9998, 0.9992, 0.9981, 0.9998, 0.9993, 0.9999, 0.9999.

Из уравнений (1–9) следует, что при  $n = 0$  термодинамические свойства должны соответствовать простым оксидам  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  (1–3),  $\text{V}_2\text{O}_5$  (4–6) и  $\text{PbO}$  (7–9).

Для  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  (1–3), согласно (1), значение стандартной энтальпии образования  $\Delta_f H_{298}^{\circ} = -625.13 \pm 21.93$  кДж/моль. Величина  $S_{298}^{\circ}$  (2) равна  $150.97 \pm 2.95$  Дж/(моль К), а  $C_{p,298}^{\circ}$  (3) =  $110.40 \pm 1.97$  Дж/(моль К). Эти значения отличаются от имеющихся литературных данных ( $\Delta_f H_{298}^{\circ}$  [43],  $S_{298}^{\circ}$  [37],  $C_{p,298}^{\circ}$  [38]), соответственно, на 8 %,  $-0.2$  % и  $-2.5$  %. Значения  $\Delta_f H_{298}^{\circ}$ ,  $S_{298}^{\circ}$  и  $C_{p,298}^{\circ}$  (уравнения (4–6)) для  $\text{V}_2\text{O}_5$  равны, соответственно,  $1684.3 \pm 74.1$  кДж/моль,  $143.56 \pm 29.23$  Дж/(моль К) и  $137.82 \pm 6.05$  Дж/(моль К), что отличается от аналогичных результатов для энтальпии и энтропии [37], теплоемкости [44] на 7.9 %, 8.7 % и 8.2 %. В случае системы  $\text{PbO-Fe}_2\text{O}_3$  такие отклонения составляют 48.4, 0.01 и 4.5 %. Из этих результатов следует, что наибольшие отклонения наблюдаются для стандартной энтальпии образования оксидов (особенно для системы  $\text{PbO-Fe}_2\text{O}_3$ ). Причина этого явления остается невыясненной. Можно предположить, что рассчитанные значения  $\Delta_f H_{298}^{\circ}$  системы  $\text{PbO-Fe}_2\text{O}_3$  [12] являются завышенными. Не исключено, что это связано с особенностями её диаграммы состояния: практически все соединения существуют только при высоких температурах [36].

В качестве примера расчет теплоемкости  $C_{p,298}^{\circ}$  для оксидных соединений системы  $\text{SrO} - \text{Bi}_2\text{O}_3$  будем проводить на основе уравнения (3) и следующих эмпирических соотношений: аддитивного правила Неймана-Коппа (НК) [11, 12, 44], инкрементного метода Кумока (ИМК) [11, 45], Келлога (Кел) [37, 46], групповых вкладов (ГВ) [47]. Полученные результаты приведены в табл. 1. Из нее следует, что лучшее согласие с экспериментальными результатами дает инкре-

Таблица 1. Расчет теплоемкости  $C_{p,298}^{\circ}$  соединений системы  $\text{SrO} - \text{Bi}_2\text{O}_3$  эмпирическими уравнениями (Дж/(моль К))

Table 1. Calculation of the heat capacity  $C_{p,298}^{\circ}$  of compounds of the  $\text{SrO} - \text{Bi}_2\text{O}_3$  system using empirical equations (J/(mol K))

Соединение	Экспер. [38]	НК	ИМК	Кел	ГВ	Расчет ур-ние (3)
$\text{SrBi}_2\text{O}_4$	155.6	157.3(1.1)*	154.1(-1.0)	152.7(-1.9)	151.4(-2.7)	158.0(1.5)
$\text{Sr}_2\text{Bi}_2\text{O}_5$	201.9	220.4(9.1)	200.1(-0.9)	199.7(-1.1)	190.2(-5.8)	205.5(1.7)
$\text{Sr}_3\text{Bi}_2\text{O}_6$	-	247.6	246.1	240.6	237.3	253.1
$\text{Sr}_6\text{Bi}_2\text{O}_9$	-	383.0	384.1	372.4	363.8	395.7
$\text{Sr}_8\text{Bi}_2\text{O}_{11}$	-	473.3	476.1	460.2	456.7	490.8

Примечание. \* – в скобках указаны отклонения от экспериментальных данных, %

ментный метод Кумока. Следует отметить, что значения теплоемкости, рассчитанные по уравнению (3) и взятые из работы [12], различаются не более чем на 1 %.

Аналогичные результаты получены и при расчете теплоемкости  $C_{p,298}^{\circ}$  выше перечисленными методами для оксидных соединений в системах  $\text{V}_2\text{O}_5 - \text{Bi}_2\text{O}_3$  и  $\text{PbO} - \text{Fe}_2\text{O}_3$ .

## Выводы

С использованием имеющихся литературных данных о термодинамических свойствах соединений в системах  $\text{SrO} - \text{Bi}_2\text{O}_3$ ,  $\text{V}_2\text{O}_5 - \text{Bi}_2\text{O}_3$  и  $\text{PbO} - \text{Fe}_2\text{O}_3$  установлена корреляция между стандартными значениями энтальпий  $\Delta_f H_{298}^0$ , энтропий  $S_{298}^0$  образования, теплоемкости  $C_{p,298}^0$  и составом образующихся оксидных фаз. Установленная линейная зависимость позволила оценить стандартные термодинамические функции индивидуальных оксидов при условии существования устойчивых оксидных соединений при 298 К.

## Список литературы / References

- [1] Yang Y., Wang X., Qu J. Preparation and photocatalytic degradation of mslachite green by photocatalyst  $\text{SrBi}_4\text{O}_7$  under visible light irradiation. *Appl. Mechanics Mater.* 2014. 522–524. 411–415.
- [2] Нащочин Е.О., Штарев Д.С., Штарева А.В. [и др.]. Висмутаты стронция  $\text{Sr}_2\text{Bi}_2\text{O}_5$  и  $\text{Sr}_6\text{Bi}_2\text{O}_{11}$ : зависимость энергии Урбаха и “Урбаховских фокусов” от температуры. *Физика: фундаментальные и прикладные исследования, образование: материалы XVI регион. научн. конф.* 1–4 октября 2018 г., Хабаровск. Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2018. 49–52. [Nashchochin E. O., Shtarev D. S., Shtareva A. V. [et al.]. Strontium bismuthates  $\text{Sr}_2\text{Bi}_2\text{O}_5$  and  $\text{Sr}_6\text{Bi}_2\text{O}_{11}$ : dependence of the Urbach energy and “Urbach focuses” on temperature. *Physics: Fundamental and Applied Research, Education: Materials of the XVI regional sci. conf.* October 1–4, 2018, Khabarovsk. Publishing House of the Pacific State University, 2018. 49–52 (In. Russ.)]
- [3] Shtareva A. V., Shtarev D. S., Balanov M. I. [et al.]. Bismuthyl Carbonate Heterostructures Are a Way to Enhance the Photocatalytic Activity of Alkaline-Earth Bismuthates. *Russian Journal of Inorganic Chemistry.* 2022. 67(9). 1375–1385.
- [4] Макаревич К.С., Зайцев А.В., Каминский О.И. [и др.]. Фотокаталитические свойства висмутатов стронция  $\text{SrBi}_4\text{O}_7/\text{Bi}_2\text{O}_3$  в процессе разложения метиленового синего под действием излучения видимого спектра. *Физика: фундаментальные и прикладные исследования, образование: материалы XV регион. научн. конф.* Благовещенск: изд-во Амурск. гос. ун-та. 2017. 107–110. [Makarevich K. S., Zaitsev A. V., Kaminskii O. I. [et al.]. Photocatalytic properties of  $\text{SrBi}_4\text{O}_7/\text{Bi}_2\text{O}_3$  strontium bismuthates during the decomposition of methylene blue under the action of visible spectrum radiation. *Physics: Fundamental and Applied Research, Education: Materials of the XV regional sci. conf.* Blagoveshchensk: Publishing House of the Amur State University. 2017. 107–110 (In Russ.)]
- [5] Ershov D. S., Besprozvannykh N. V., Sinel'shchikova O. Y. Photocatalytic properties of composites based on  $\text{SrO}-\text{Bi}_2\text{O}_3-\text{Fe}_2\text{O}_3$  obtained by different methods. *Glass Phys. Chem.* 2020. 46(4). 329–334.
- [6] Shan Z., Xia Y., Yang Y. [et al.]. Preparation and photocatalytic activity of novel efficient photocatalyst  $\text{Sr}_2\text{Bi}_2\text{O}_5$ . *Mater. Lett.* 2009. 63. 75–77.
- [7] Shtarev L. S., Shtareva A. V., Syuy A. V. [et al.]. Synthesis and photocatalytic properties of alkaline earth metals bismuthates-bismuth oxide compositions. *Optik.* 2016. 127. 1414–1420.
- [8] Li T., Wang Y., He Y. [et al.]. Preparation and photocatalytic property of  $\text{Sr}_{0.25}\text{Bi}_{0.75}\text{O}_{1.36}$  photocatalyst. *Mater. Lett.* 2012. 74. 170–172.
- [9] Wang B., Wang S., Gong L. [et al.]. Structural, magnetic and photocatalytic properties of  $\text{Sr}^{2+}$ -doped  $\text{BiFeO}_3$  nanoparticles based on an ultrasonic irradiation assisted self-combustion method. *Ceram. Internat.* 2012. 38. 6643–6649.



- [10] Besprozvannykh N. V., Ershov D. S., Sinelshchikova O. Y. SrO–BiP<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-based composites synthesis and electrophysical properties. *Russ. J. General Chem.* 2019. 89(12). 2458–2462.
- [11] Моисеев Г. К., Ватолин Н. А., Маршук Л. А. [и др.]. *Температурные зависимости приведенной энергии Гиббса некоторых неорганических веществ. Альтернативный банк данных АСТРА.* OWN. Екатеринбург: УрО РАН, 1997. 230 [Moiseev G. K., Vatolin N. A., Marshuk L. A. [et al.]. *Temperature dependences of the Gibbs energy of some inorganic inclusion.* Yekaterindurg: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 1997. 230 (In Russ.)]
- [12] Моисеев Г. К., Ватолин Н. А., Маршук Л. А. [и др.]. *Некоторые закономерности изменения и методы расчета термодимических свойств неорганических соединений.* Екатеринбург: УрО РАН, 2001. 134 [Moiseev G. K., Vatolin N. A., Marshuk L. A. [et al.]. *Thermochemical Properties of Inorganic Compounds: Some General Trends and Computational Approaches.* Yekaterinburg: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. 2001. 134 (In Russ.)]
- [13] Samokhvalov A. V., Melnikov A. S., Buzdin A. I. Vortex molecules in films of layered superconductors. *Low Temperature Phys.* 2018. 44(6). 534–342.
- [14] Aliev V. M., Mamedova A. N., Raqimov S. S. [et al.]. A study of the pseudogap state in Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>CaCu<sub>2</sub>O<sub>x</sub> and Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>ZnCu<sub>2</sub>O<sub>y</sub> HTSC materials. *Low Temperature Phys.* 2016. 42(10). 930–935.
- [15] Savchenko A. M., Savchenko M. A. Possible increase in the critical temperature of high – temperature superconductors based on the synthesis of new classes of HTSC compounds. *Low Temperature Phys.* 2016. 42(10). 940–945.
- [16] Фотиев А. А., Слободин Б. В., Ходос М. Я. *Ванадаты. Состав, синтез, структура, свойства.* М.: Наука, 1988. 272 [Fotiev A. A., Slobodin B. V., Khodos M. Ia. *Vanadates. Composition, synthesis, structure, properties.* Moscow: Nauka, 1988. 272 (In Russ.)]
- [17] Chen X., Liu J., Wang H. [et al.]. One-step approach to novel B<sub>4</sub>V<sub>2</sub>O<sub>11</sub> hierarchical hol-low microspheres with high visible-light-driven photocatalytic activities. *J. Mater. Chem. A.* 2013. (1). 877–883.
- [18] Tripathy D., Pandey A. Studies on structural and optical properties and its correlation with the ionic conductivity of the Bi<sub>2</sub>VO<sub>5.5</sub>-based oxide ionic conductors. *Solid State Ionics.* 2019. 341. 115038–115042.
- [19] Trziński K., Gasiorowski J., Borowska-Centkowska A. [et al.]. Optical and photoelectrochemical characterization of pulser laser deposited Bi<sub>4</sub>V<sub>2</sub>O<sub>11</sub>, BICUVOX, and BIZNVOX. *Thin Solid Films.* 2017. 638. 251–257.
- [20] Wen X.-J., Qian-Lu, Lv X.-X. [et al.]. Photocatalytic degradation of sulfamethazine using a direct Z-scheme AgJ/Bi<sub>4</sub>V<sub>2</sub>O<sub>11</sub> photocatalyst: Mineralization activity, degradation pathways and promoted charge separation mechanism. *J. Hazardous Mater.* 2020. 385. 121508–1 – 121508–12.
- [21] Nakajima T., Abe H., Suzuki Y. Effect of transition metal oxides addition on the color tone of Bi<sub>4</sub>V<sub>2</sub>O<sub>11</sub>-based red pigments. *J. Ceram. Soc. Jap.* 2022. 30(12). 236–242.
- [22] Zhang Y., Ueda Y. Interlayer switching of reduction in layered oxide, Bi<sub>4</sub>V<sub>2</sub>O<sub>11-δ</sub> (0 ≤ δ ≤ 1). *Inorg. Chem.* 2013. 52. 5206–5213.
- [23] Lv C., Chen G., Zhou X. [et al.]. Oxygen-induced Bi<sup>5+</sup>-self-doped Bi<sub>4</sub>V<sub>2</sub>O<sub>11</sub> with a p-n homojunction toward promoting the photocatalytic performance. *Appl. Mater. Interfaces.* 2017. (9). 23748–23755.

- [24] Винник Д. А., Трофимов Е. А., Зайцева О. В. [и др.]. Фазовая диаграмма системы BaO-PbO-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. *Вестник ЮУрГУ. Сер. Химия*. 2017. 8(3). 48–58. [Vinnik D. A., Trofimov E. A., Zaitseva O. V. [et al.]. Phase diagram of BaO-PbO-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> system. *Bulletin of SUSU. Ser. Chemistry*. 2017. 8(3). 48–58. (In Russ.)]
- [25] Винник Д. А. Получение монокристаллов гексаферрита бария свинца из раствора. *Вестник ЮУрГУ. Сер. Металлургия*. 2016. 16(1). 7–12. [Vinnik D. A. Obtaining monocrystals of lead barium hexaferrite from solution. *Bulletin of SUSU. Ser. Metallurgy*. 2016. 16(1). 7–12. (In Russ.)]
- [26] Bezlepkin A. A., Kuntsevich S. P., Kostyukov V. I. Orientational and relaxation features of the dynamic magnetic susceptibility of PbFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub> upon transition from the magnetically to paramagnetic state. *Phys. Sol. State*. 2015. 57(11). 2213–2216.
- [27] Bezlepkin A. A., Kuntsevich S. P. Peculiarities of the critical dynamics in magnetically uniaxial PbFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub> hexaferrite. *Sol. State*. 2018. 60(1). 64–67.
- [28] Vstauskaya E. Yu., Zuev A. Yu., Cherepanov V. A. [et al.]. The Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SrO phase diagram. *J. Phase Equilibria*. 1994. 15(6). 573–576.
- [29] Hwang N. M., Roth R. S., Rawn C. J. Phase equilibria in the systems SrO-1/2Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. *J. Am. Ceram. Soc.* 1990. 73(8). 2531–2533.
- [30] Jacob K. T., Jayadevan K. P. System Bi-Sr-O: Synergistic measurements of thermodynamic properties using oxide and fluoride solid electrolytes. *J. Mater. Res.* 1998. 13(7). 1905–1918.
- [31] Жереб В. П. *Метастабильные состояния в оксидных висмутсодержащих системах*. М.: МАКС Пресс. 2003. 163 [Zhereb V. P. *Metastable states in bismuth-containing oxide systems*. Moscow: MAKS Press, 2003. 163 (In Russ.)]
- [32] Gong W., Zhang R. Thermodynamic investigation of the TiO<sub>2</sub>-La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> pseudo-binary system. *Thermochim. Acta*. 2012. 534. 28–32.
- [33] Gong W., Zhang R. Phase relationship in the TiO<sub>2</sub>-Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> pseudo-binary system. *J. Alloys Compd.* 2013. 548. 216–221.
- [34] Gong W., Liu Y., Luo Z. Heat capacity of samarium titanates and phase equilibria of Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub> system. *J. Alloys Compd.* 2021. 860. 158429–1 – 1–158429–9.
- [35] Denisova L. T., Irtyugo L. A., Chumilina L. G. [et al.]. High-temperature heat capacity of the oxide compounds in the Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> system. *Inorg. Mater.* 2017. 53(3). 300–306.
- [36] Vinnik D. A., Trofimov E. A., Zherebtsov D. A. Experimental study and thermodynamic modeling of phase equilibria in the PbO-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> system. *Mater. Sci. Forum*. 2016. 870. 282–285.
- [37] Кубашевский О., Алкокк С. В. *Металлургическая термохимия*. М.: Металлургия. 1982. 392 [Kubaschewski O., Alcock C. B. *Metallurgical thermochemistry*. Pergamon Press Ltd. 1982. 392 (In Russ.)]
- [38] Leitner J., Sedmidubský D., Růžička K. [et al.]. Heat capacity, enthalpy and entropy of SrBi<sub>2</sub>O<sub>4</sub> and Sr<sub>2</sub>Bi<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. *Thermochim. Acta*. 2012. 531. 60–65.
- [39] Морачевский А. Г., Сладков И. Б., Фирсова Е. Г. *Термодинамические расчеты в химии и металлургии*. СПб.: Лань. 2018. 208 [Morachevskii A. G., Sladkov I. B., Firsova E. G. *Thermodynamic calculation in chemistry and metallurgy*. Lan.: St. Petersburg. 2018. 208 (In Russ.)]
- [40] Denisova L. T., Belousova N. V., Denisov V. M. Thermodynamic properties of SrAl<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>8</sub>. *J. Sib. Fed. Univ. Chem.* 2022. 15(2). 236–242.
- [41] Chumilina L. G., Belokopytova D. V., Denisov V. M. Calculation of thermodynamic properties of germanares Ca<sub>3</sub>R<sub>2</sub>Ge<sub>3</sub>O<sub>12</sub> (R = Y, Er-Lu). *J. Sib. Fed. Univ. Chem.* 2022. 15(3). 409–419.



[42] Bogach V. V., Dobrydnev S. V., Beskov V. S. Calculation of the thermodynamic properties of apatites. *Russ. J. Inor. Chem.* 2001. 46(7). 1011–1014.

[43] Денисов В. М., Белоусова Н. В., Моисеев Г. К. [и др.]. *Висмутсодержащие материалы: строение и физико-химические свойства*. Екатеринбург: УрО РАН. 2000. 526 [Denisov V. M., Belousova N. V., Moiseev G. K. [et al.] *Bismuth-containing materials: structure and physico-chemical properties*. *Yekaterinburg: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences*. 2000. 526 (In Russ.)]

[44] Leitner J., Chuchvalec P., Sedmidubský D. [et al.]. Estimation of heat capacities of solid mixed oxides. *Thermochim. Acta*. 2003. 395. 27–46.

[45] Кумок В. Н. Проблемы согласования методик оценки термодинамических характеристик. *Прямые и обратные задачи химической термодинамики*. Новосибирск: Наука. 1987. 108–123 [Kumok V. N. *Pryamye I obratnye zadachi khimicheskoi termodynamiki (direct and inverse problems of chemical thermodynamic)*. Novosibirsk: Nauka. 108–123 (in Russ.)]

[46] Spencer P. J. Estimation of thermodynamic data for metallurgical applications. *Thermochim. Acta*. 1998. 314. 1–21.

[47] Mostafa A. T. M. G., Eakman J. M., Montoya M. M. [et al.]. Prediction of heat capacities of solid inorganic salts from group contributions. *Ind. Rng. Chem. Res.* 1996. 35. 343–348.