

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И РАСЧЕТНЫЕ ВЕЛИЧИНЫ СТАНДАРТНОЙ ЭНТАЛЬПИИ ОБРАЗОВАНИЯ АРСЕНАТОВ ЩЕЛОЧНЫХ И ЩЕЛОЧНОЗЕМЕЛЬНЫХ МЕТАЛЛОВ

Е.С. Мустафин

Карагандинский государственный университет им. Е.А. Букетова

E-mail: edigemus@mail.ru

Исследованы термохимические характеристики взаимодействия в водной среде хлоридов щелочноземельных металлов с ортоарсенатом натрия.

Ключевые слова:

Ортоарсенаты, термохимические константы, термодинамические константы.

Key words:

Orthoarsenates, thermochemical constants, thermodynamic constants.

Введение

Неорганические соединения мышьяка – один из малоисследованных разделов в неорганической химии и цветной металлургии. Возможность удаления мышьяксодержащих соединений из технологических процессов сдерживается отсутствием данных, по их физико-химическим свойствам, в частности, по их термическим и термодинамическим константам. Исследование химических и физико-химических свойств оксоарсенатов имеет важное теоретическое и прикладное значение для восполнения пробелов в знании неорганической химии мышьяксодержащих соединений, для получения арсенатов, обладающих полупроводниковыми, сегнетоэлектрическими и другими свойствами, для физико-химического обоснования процессов вывода мышьяка при производстве цветных металлов, для получения новых информационных массивов, которые служат исходными материалами для загрузки в банки данных фундаментальных термохимических, термодинамических констант. В то же время исследование физико-химических свойств соединений мышьяка представляет интерес с точки зрения теоретической химии.

В справочнике [1] имеются рекомендованные значения стандартных энтальпий образования ортоарсенатов магния, кальция, стронция и бария в аморфном, кристаллическом и свежесажденном кристаллическом состоянии (табл. 1). Следует отметить, что если в [1] приведены $\Delta_f H^\circ(298,15)$ $Mg_3(AsO_4)_2$ в аморфном состоянии, то его энтальпия образования в кристаллическом состоянии будет отличаться на величину фазового перехода (аморф.→кристалл.), которая неизвестна. Не исключено, что значения $\Delta_f H^\circ(298,15)$ свежесажденных кристаллов $Sr_3(AsO_4)_2$ и $Ba_3(AsO_4)_2$, также будут отличаться от энтальпии образования этих соединений в кристаллическом устойчивом равновесном состоянии. Поэтому интерпретировать однозначно значения $\Delta_f H^\circ(298,15)$ ортоарсенатов трудно.

Удовлетворительные результаты можно получить, исходя из данных произведения растворимости. В [2, 3] даны величины $\lg PP$ $Mg_3(AsO_4)_2$, $Ca_3(AsO_4)_2$ и $Sr_3(AsO_4)_2$, которые соответственно

равны –19,68; –18,17 и –17,79. С использованием известных соотношений, вытекающих из термодинамики процессов растворения, стандартную энергию Гиббса арсенатов в твердом состоянии можно получить по схемам:

$$\Delta G-(M_3(AsO_4)_2, \text{нас. p-p}) = \Delta_f G^\circ(298,15, M_3(AsO_4)_2, \text{тв.}) \quad (1)$$

$$\Delta G-(M_3(AsO_4)_2, \text{нас. p-p}) = \Delta_f G^\circ(298,15, M_3(AsO_4)_2, \text{p-p, H}_2\text{O, ст. сост.}) + RT \ln M_3(AsO_4)_2 \text{ n} \quad (2)$$

$$\Delta_f G^\circ(298,15, M_3(AsO_4)_2, \text{p-p, H}_2\text{O, ст. сост.}) = 3\Delta_f G^\circ(298,15, M^{2+}, \text{p-p, H}_2\text{O, ст. сост.}) + 2\Delta_f G^\circ(298,15, AsO_4^{3-}, \text{p-p, H}_2\text{O, ст. сост.}) \quad (3)$$

$$aM_3(AsO_4)_2 = a^3M^{2+} \cdot a^2AsO_4^{3-} \quad (4)$$

$$a^3M^{2+} \cdot a^2AsO_4^{3-} = K_s \quad (5)$$

$$\Delta_f H^\circ(298,15, M_3(AsO_4)_2, \text{тв.}) = \Delta_f G^\circ(298,15, M_3(AsO_4)_2, \text{тв.}) + \Delta_f S^\circ(298,15, M_3(AsO_4)_2, \text{тв.}) \cdot 298,15 \text{ }^\circ\text{C} \quad (6)$$

Необходимые данные для расчета по схемам (1–6) заимствованы из [1, 4, 5]. Вычисленные по соотношениям (1–6) энтальпии образования ортоарсенатов приведены в табл. 1. $\Delta_f H^\circ(298,15)$ ортоарсенатов также рассчитаны с использованием разработанной нами системы энтальпийных инкрементов по схеме 7 [6–8]:

$$\Delta_f H^\circ(298,15, M_3(AsO_4)_2, \text{тв.}) = 3\Delta_f H^\circ(298,15, M^{2+}, \text{p-p, H}_2\text{O, ст. сост.}) \cdot K + 2\Delta_f H^\circ(298,15, AsO_4^{3-}) \quad (7)$$

Стандартные энтальпии образования метаарсенатов вычислены также по соотношению:

$$\frac{\Delta_f H^\circ(298,15, M_3AsO_4, \text{тв.})}{\Delta_f H^\circ(298,15, MAsO_3, \text{тв.})} = \frac{\Delta_f H^\circ(298,15, M_3(AsO_4)_2, \text{тв.})}{\Delta_f H^\circ(298,15, M(AsO_3)_2, \text{тв.})} \quad (8)$$

где M_3AsO_4 , $MAsO_3$ – орто- и метаарсенаты щелочных металлов, $\Delta_f H^\circ(298,15)$ которых приведены в [10–21].

Стандартные энтальпии образования арсенатов также вычислены из приближенных значений энтальпийных инкрементов ионов AsO_3^- и $As_2O_7^{4-}$ (табл. 1). Несмотря на разные методы вычисления, см. (8), полученные значения $\Delta_f H^\circ(298,15)$ удовлетворительно согласуются между собой.

Таблица 1. Стандартные энтальпии образования арсенатов щелочноземельных металлов

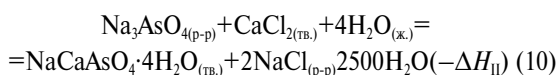
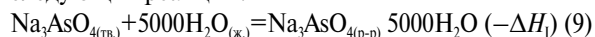
Арсенаты	$-\Delta_f H^\circ(298,15)$, кДж/моль			
	По [1]	По схемам (1–6)	По схемам (7, 8)	По [9]
$Mg_3(AsO_4)_2$	3116,7	3029,7	3126,3	–
$Ca_3(AsO_4)_2$	3294,5	3280,7	3347,4	–
$Sr_3(AsO_4)_2$	3393,2	3324,6	3372,0	–
$Ba_3(AsO_4)_2$	3418,2	–	3291,2	–
$Mg_2As_2O_7$	–	–	–	2368,1
$Ca_2As_2O_7$	–	–	–	2528,4
$Sr_2As_2O_7$	–	–	–	2557,3
$Ba_2As_2O_7$	–	–	–	2551,8
$Mg(AsO_3)_2$	–	–	1743,6	1673,2
$Ca(AsO_3)_2$	–	–	1810,9	1752,7
$Sr(AsO_3)_2$	–	–	1852,1	1765,6
$Ba(AsO_3)_2$	–	–	1857,9	1748,1

Экспериментальная часть

Термохимические опыты проведены на микрокалориметре ДАК-I-IA. Методика работы, калибровка и проверка точности измерения подробно описана в [22, 23]. Калибровка прибора проводилась по джоулевому теплу путем подачи на встроенный нагреватель калибровочного напряжения и измерения выделяющейся мощности. Проверка работы калориметра проведена по измерению теплоты растворения трижды перекристаллизованного KCl при разбавлениях равных 1 : 1600, 1 : 2400, 1 : 3200 (в молярном соотношении соли и воды 1 : 1). Погрешность опытных данных и однородность дисперсий рассчитаны методом математической статистики с применением критериев Стьюдента и Бартлетта [24]. Средняя теплота растворения KCl в воде 17268 ± 356 Дж/моль хорошо согласуется с рекомендованной величиной, равной 17577 ± 34 Дж/моль [25].

Исходные вещества $CaCl_2$ получили обезвоживанием $CaCl_2 \cdot 6H_2O$ марки «ч.д.а.», а Na_3AsO_4 – по [10]. Полученный осадок $NaCaAsO_4 \cdot 4H_2O$ оказался рентгеноаморфным. Дериватограмма имеет эндоэффект удаления 4 молекул воды в интервале 70...220 °C и экзоэффект перехода аморфное → кристаллическое при 600...605 °C. Рентгенограмма кристаллического $NaCaAsO_4$ удовлетворительно согласуется с данными [22].

Стандартную энтальпию образования $NaCaAsO_4 \cdot 4H_2O$ определяли экспериментальным путем на основании измерения тепловых эффектов следующих реакций:



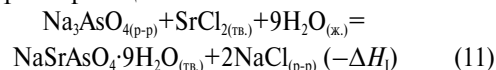
Наряду с тепловыми эффектами реакций (9, 10) для расчета $\Delta_f H^\circ(298,15)$ $NaCaAsO_4 \cdot 4H_2O$ были использованы $\Delta_f H^\circ(298,15)$ следующих веществ: $Na_3AsO_{4(тв.)} = -1535,5 \pm 9,6$; $CaCl_{2(тв.)} = -795,92 \pm 0,96$ [1], $H_2O_{(ж.)} = -285,829 \pm 0,040$ [24], $NaCl$ (р-р, 2000 H_2O) = $-407,275 \pm 0,25$ кДж/моль [25]. В связи с тем, что в справочнике [26] отсутствует величина $\Delta_f H^\circ(298,15)$, $NaCl$, р-р, 2500 H_2O , ее приравняли к $\Delta_f H^\circ(298,15)$, $NaCl$, р-р, 2000 H_2O , так как разница между ними должна быть пренебрежимо малой и ниже погрешностей тепловых эффектов реакций (9,10).

На основании вышеуказанных данных вычислена $\Delta_f H^\circ(298,15)$ $NaCaAsO_4 \cdot 4H_2O_{(тв.)}$, равная $-2789,5 \pm 10,2$ кДж/моль. По инкрементам [27] вычислены $S^\circ(298,15)$ и $C_p^\circ(298,15)$ $7NaCaAsO_4 \cdot 4H_2O$, равные соответственно 195,3 и 184,0 Дж/(моль·К). Следует подчеркнуть корректность определенной нами величины энтальпии растворения Na_3AsO_4 при разбавлении моль соли : моль воды, равной 1 : 5000. Рекомендованное значение энтальпии растворения Na_3AsO_4 при бесконечном разбавлении равно $-75,77$ кДж/моль, и наши результаты при таком разбавлении должны быть близки, что фактически подтверждается опытными данными (табл. 2). Эти результаты по энтальпиям растворения Na_3AsO_4 в дальнейшем использованы для определения $\Delta_f H^\circ(298,15)$ кристаллогидратов других двойных арсенатов щелочных и щелочноземельных металлов.

Таблица 2. Тепловые эффекты растворения Na_3AsO_4 в воде и взаимодействия его водного раствора с $CaCl_2$

Навеска арсената, г	$-\Delta H_{раств.}$, Дж	$-\Delta H_{раств.}$, кДж/моль	Навеска хлорида, г	$-\Delta H_{вз.}$, Дж	$-\Delta H_{вз.}$, кДж/моль
0,0114	3,8400	69,824	0,0062	3,2189	58,526
0,0115	3,8970	70,869	0,0061	3,0760	55,927
0,0116	3,9171	71,224	0,0062	3,1550	57,364
0,0115	3,8260	69,567	0,0061	3,0652	55,732
0,0116	3,9750	72,289	0,0062	3,1622	57,496
0,0116	4,0166	73,030	0,0063	3,5014	63,663
$\Delta H_{раств.}^\circ = -71,13 \pm 1,42$		$\Delta H_{вз.}^\circ = -58,12 \pm 3,1$			

Стандартную энтальпию образования $NaSrAsO_4 \cdot 9H_2O$ находили путем измерения теплового эффекта реакции



Необходимый для реакции (11) $SrCl_2$ получен обменной реакцией $SrCO_3$ марки «о.с.ч.» (МРТУ 6-09-813-63) и соляной кислоты с дальнейшей перекристаллизацией и обезвоживанием. Образующийся $NaSrAsO_4 \cdot 9H_2O$ при нагревании переходит в безводный $NaSrAsO_4$, рентгенограмма которого удовлетворительно согласуется с данными [28].

Результаты калориметрических исследований приведены в табл. 3.

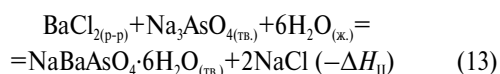
Для расчета $\Delta_f H^\circ(298,15)$ $NaSrAsO_4 \cdot 9H_2O$ кроме теплового эффекта реакции (11) и $\Delta_f H^\circ(298,15)$ вышеуказанных веществ использована стандартная теплота образования $SrCl_{2(тв.)}$, равная $-834,33 \pm 0,71$ кДж/моль [1]. Таким образом, вычисленное значение $\Delta_f H^\circ(298,15)$ $NaSrAsO_4 \cdot 9H_2O$ равно $-4141,1 \pm 12,0$ кДж/моль. Незна-

чительное отличие от результатов в [22] ($-4151,2 \pm 10,5$ кДж/моль) связано с уточнением энтальпии растворения Na_3AsO_4 .

Таблица 3. Тепловые эффекты взаимодействия водного раствора Na_3AsO_4 с SrCl_2 при разбавлении 1 : 5000

Масса хлорида, г	$-\Delta H_{\text{вз.},r}$ Дж	$-\Delta H_{\text{вз.},r}^{\circ}$ кДж/моль
0,0058	3,1262	56,328
0,0060	3,3278	59,960
0,0059	3,1943	57,555
0,0059	3,2119	57,872
0,0059	3,2009	57,668
$\Delta H_{\text{вз.}}^{\circ} = -57,88 \pm 1,63$		

При определении $\Delta_r H^{\circ}(298,15)$ кристаллогидрата натрия-бариевого ортоарсената внесли изменения в порядок определения тепловых эффектов реакций: вместо Na_3AsO_4 растворяли в воде BaCl_2 , а затем осуществляли обменную реакцию водного раствора BaCl_2 с твердым Na_3AsO_4 :



Образование $\text{NaBaAsO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ подтверждалось методом дифференциально-термического анализа (ДТА) и рентгенофазового анализа. Эндозффект на кривой ДТА при 160°C указывает на удаление 6 молекул воды и образование безводного NaBaAsO_4 . Рентгенографические характеристики безводного NaBaAsO_4 полностью согласуются с данными [27]. Сравнение энтальпии растворения BaCl_2 при заданном разбавлении ($-11,64 \pm 0,14$ кДж/моль) со справочным значением ($-13,47$ кДж/моль) [28] показывает неплохую сходимость. В табл. 4 приведены результаты калориметрических исследований.

Для расчета стандартной энтальпии образования $\text{NaBaAsO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ наряду с тепловыми эффектами реакций (12, 13) и $\Delta_r H^{\circ}(298,15)$ других, уже названных веществ, использована $\Delta_r H^{\circ}(298,15)$, $\text{BaCl}_{2(\text{тв.})}$, равная $-843,95 \pm 2,09$ кДж/моль [1].

Таким образом, на основании вышеуказанных данных для $\text{NaBaAsO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ вычислена $\Delta_r H^{\circ}(298,15)$, равная $-3189,1 \pm 11,1$ кДж/моль; $S^{\circ}(298,15)$ и $C_p^{\circ}(298,15)$, равные соответственно 422,9 и 389,1 Дж/(моль·К).

Следует отметить, что безводные двойные ортоарсенаты щелочных и щелочноземельных металлов представляют собой отдельный и не изученный в термодинамическом и термодинамическом отношении класс соединений. Мы на основе своих систем инкрементов энтальпии и энергии Гиббса вычислили стандартные энтальпии и энергии Гиббса образования арсенатов. С использованием $\Delta_r G^{\circ}(298,15)$ решили обратную задачу, т. е. рассчитали произведения растворимости (табл. 5).

Приведенные данные могут служить исходными базовыми материалами для справочников фундаментальных термодинамических и термодинамических констант.

Таблица 4. Тепловые эффекты растворения BaCl_2 в воде ($\Delta_r H^{\circ}_{\text{раств.},r}$) и взаимодействия ($\Delta_r H^{\circ}_{\text{вз.},r}$) его водного раствора с Na_3AsO_4 (m_x, m_x – навеска арсената и хлорида) при мольном разбавлении соль : вода = 1 : 5000

m_x , г	$-\Delta_r H^{\circ}_{\text{раств.},r}$ Дж	$-\Delta_r H^{\circ}_{\text{раств.},r}$ кДж/моль	m_x , г	$-\Delta_r H^{\circ}_{\text{вз.},r}$ Дж	$-\Delta_r H^{\circ}_{\text{вз.},r}$ кДж/моль
0,0115	0,6379	11,494	0,0076	3,6585	98,878
0,0116	0,6531	11,768	0,0076	3,5946	97,146
0,0115	0,6409	11,548	0,0077	3,9255	106,095
0,0116	0,6497	11,707	0,0077	3,9062	105,557
0,0116	0,6477	11,670	0,0077	3,8757	104,748
$\Delta_r H^{\circ}_{\text{раств.}} = -11,64 \pm 0,14$			$\Delta_r H^{\circ}_{\text{вз.}} = -102,49 \pm 5,16$		

Таблица 5. Стандартные термодинамические функции и произведения растворимости двойных арсенатов щелочных и щелочноземельных металлов

Соединение	C_p° (298,15), Дж/(моль·К)	S° (298,15), Дж/(моль·К)	$-\Delta_r H^{\circ}$ (298,15), кДж/моль	$-\Delta_r G^{\circ}$ (298,15), кДж/моль	$-\lg K_{\text{пр}}$
LiMgAsO ₄	132,0	118,5	1606,9	1455,7	6,73
LiCaAsO ₄	237,1	134,0	1680,5	1555,1	10,71
LiSrAsO ₄	139,1	145,0	1688,8	1566,1	10,79
LiBaAsO ₄	138,2	155,6	1661,9	1548,9	19,67
NaMgAsO ₄	138,1	138,6	1569,5	1424,3	9,81
NaCaAsO ₄	143,2	154,1	1643,2	1523,7	10,50
NaSrAsO ₄	145,2	165,1	1651,4	1535,3	10,57
NaBaAsO ₄	144,3	175,7	1624,5	1517,3	10,45
KMgAsO ₄	139,3	151,2	1581,1	1445,6	6,68
KCaAsO ₄	144,4	166,7	1654,8	1544,9	10,64
KSrAsO ₄	146,4	177,7	1663,1	1556,6	10,73
KBaAsO ₄	145,5	188,3	1636,1	1538,8	10,61
RbMgAsO ₄	142,1	160,0	1579,9	1446,6	6,67
RbCaAsO ₄	147,2	175,5	1653,6	1546,0	10,65
RbSrAsO ₄	149,2	186,5	1661,9	1557,6	10,72
RbBaAsO ₄	148,3	197,1	1634,9	1529,8	10,60
CsMgAsO ₄	142,4	171,6	1586,8	1455,0	6,74
CsCaAsO ₄	147,5	187,1	1586,9	1554,0	10,70
CsSrAsO ₄	149,5	198,1	1668,8	1655,0	10,79
CsBaAsO ₄	148,6	208,7	1641,8	1548,2	10,67

Выводы

Исследованы термодинамические характеристики взаимодействия в водной среде хлоридов щелочноземельных металлов с ортоарсенатом натрия. Установлено, что при взаимодействии в водной среде CaCl_2 , SrCl_2 и BaCl_2 с NaAsO_4 образуются кристаллогидраты двойных соединений типа $\text{M}^I\text{M}^{II}\text{AsO}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$, которые при температуре $600...605^\circ\text{C}$ превращаются в безводные двойные арсенаты.

Впервые расчетными методами на основе исследования взаимодействия хлоридов щелочноземельных металлов с ортоарсенатом натрия определены термодинамические функции двойных арсенатов, которые могут быть использованы в технологическом процессе вывода мышьяка при производстве цветных металлов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Термические константы веществ. Справочник / под ред. В.П. Глушко. – М.: Наука, 1979. – Вып. IX. – 576 с.
2. Чухланцев В.Г. Произведение растворимости ряда арсенатов // Журнал неорганической химии. – 1956. – Т. 1. – № 9. – С. 1975–1982.
3. Кумок В.Н., Кулешова О.М., Карабин Л.А. Произведение растворимости. – Новосибирск: Наука, 1983. – 266 с.
4. Термические константы веществ. Справочник / под ред. В.П. Глушко. – М.: Наука, 1968. – Вып. III. – 221 с.
5. Robie R.A., Hewingway B.S., Fisher J.K. Thermodynamic Properties of Minerals and Related Substances at 298,15 and (10⁵ Paskals) Pressure and Higher Temperatures. – Washington, 1987. – 456 p.
6. Касенов Б.К., Абишев Д.Н., Бухарицын В.О. Об энтальпийных инкрементах анионов твердых оксосолей щелочных и щелочноземельных металлов // Вестник АН Казахской ССР. – 1986. – № 3. – С. 33–39.
7. Касенов Б.К., Абишев Д.Н., Бухарицын В.О. Об энтальпийных инкрементах анионов кристаллических оксосолей щелочных и щелочноземельных металлов // Термодинамика и материаловедение полупроводников: Тез. докладов III Всесоюз. конф. – М., 1986. – Т. 1. – С. 60–61.
8. Касенов Б.К., Абишев Д.Н., Бухарицын В.О. Термохимия арсенатов щелочных металлов. – Алма-Ата: Наука, 1988. – 68 с.
9. Кузгибекова Х.М., Исабаев С.М., Касенов Б.К. Термодинамический анализ взаимодействия окислов щелочноземельных металлов с пятиокисью мышьяка // Химия и технология соединений мышьяка и сурьмы. – Алма-Ата: Наука, 1980. – С. 115–120.
10. Касенов Б.К. Синтез и физико-химические свойства арсенатов s- и некоторых p-, d- и f-элементов: автореф. ... дис... докт. хим. наук. – М.: МГУ, 1991. – 44 с.
11. Букетов Е.А., Касенов Б.К., Пашилкин А.С., Исабаев С.М. Фазовые равновесия и термодинамические свойства арсенатов щелочных металлов. – Алма-Ата: Наука, 1985. – 102 с.
12. Касенов Б.К., Исабаев С.М., Полукаров А.Н. Термодинамические свойства арсенатов щелочных металлов // Журнал физической химии. – 1979. – Т. 53. – № 9. – С. 2173–2176.
13. Касенов Б.К., Исабаев С.М., Щашанова Р.Б. Стандартная энтальпия образования метаарсената калия // Журнал физической химии. – 1984. – Т. 58. – № 4. – С. 995–996.
14. Касенов Б.К., Бухарицын В.О., Букетов Е.А. Стандартная энтальпия образования метаарсената натрия // Комплексное использование минерального сырья. – 1986. – № 6. – С. 49–52.
15. Бухарицын В.О., Касенов Б.К. Термохимия метаарсената лития // Журнал физической химии. – 1987. – Т. 61. – № 5. – С. 1359–1360.
16. Бухарицын В.О., Касенов Б.К. Термохимия арсенатов калия // Журнал прикладной химии. – 1989. – Т. 62. – № 6. – С. 14–26.
17. Касенов Б.К., Исабаев С.М., Попрукайло Н.Н. Термодинамические свойства арсенатов цезия // Журнал физической химии. – 1979. – Т. 53. – № 6. – С. 1455–1458.
18. Касенов Б.К., Абишев Д.Н., Бухарицын В.О. Физико-химия оксидных соединений мышьяка (V) и щелочных металлов // Рефераты докладов и сообщений XIV Менделеевского съезда по общей и прикладной химии. – М.: Наука, 1989. – Т. 1. – С. 157.
19. Ашляева И.В., Касенов Б.К. Стандартные термодинамические функции четырехводного и безводного натрийкальциевого ортоарсената // Комплексное использование минерального сырья. – 1990. – № 9. – С. 86–88.
20. Ашляева И.В., Касенов Б.К. Термохимия девятиводного натрий-стронциевого ортоарсената // Комплексное использование минерального сырья. – 1990. – № 11. – С. 90–92.
21. Ашляева И.В., Касенов Б.К., Бухарицын В.О. Термохимия шестиводного натрий-бариевого ортоарсената // Известия вузов СССР. Химия и химическая технология. – 1989. – Т. 32. – № 6. – С. 100–101.
22. Махметов М.Ж., Горохова Л.Г. Термическая устойчивость и растворимость арсенатов. – Алма-Ата: Наука, 1988. – 110 с.
23. Спиридонов В.П., Лопаткин А.А. Математическая обработка физико-химических данных. – М.: МГУ, 1970. – 221 с.
24. Мищенко К.П., Полторацкий Г.М. Термодинамика и строение водных и неводных растворов электролитов. – Л.: Химия, 1976. – 328 с.
25. Термические константы веществ. Справочник / под ред. В.П. Глушко. – М.: Наука, 1981. – Вып. X. – Ч. 1. – 300 с.
26. Термические константы веществ. Справочник / под ред. В.П. Глушко. – М.: Наука, 1965. – Вып. I. – 145 с.
27. Кумок В.Н. Проблема согласования методов оценки термодинамических характеристик // Прямые и обратные задачи химической термодинамики. – Новосибирск: Наука, 1987. – С. 108–123.
28. Термодинамическая база данных // Термоцентр им. В.П. Глушко. 2010. URL: <http://www.chem.msu.ru/rus/tkv/welcome.html> (дата обращения: 15.02.2010).

Поступила 26.07.2010 г.