

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 $\text{As}_2\text{O}_7^{4-}$ (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

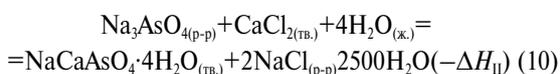
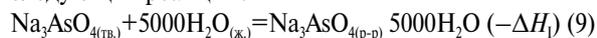
| Арсенаты | $-\Delta_f H^\circ(298,15)$, кДж/моль | | | |
|------------------------------------|----------------------------------------|-----------------|------------------|--------|
| | По [1] | По схемам (1–6) | По схемам (7, 8) | По [9] |
| $\text{Mg}_3(\text{AsO}_4)_2$ | 3116,7 | 3029,7 | 3126,3 | – |
| $\text{Ca}_3(\text{AsO}_4)_2$ | 3294,5 | 3280,7 | 3347,4 | – |
| $\text{Sr}_3(\text{AsO}_4)_2$ | 3393,2 | 3324,6 | 3372,0 | – |
| $\text{Ba}_3(\text{AsO}_4)_2$ | 3418,2 | – | 3291,2 | – |
| $\text{Mg}_2\text{As}_2\text{O}_7$ | – | – | – | 2368,1 |
| $\text{Ca}_2\text{As}_2\text{O}_7$ | – | – | – | 2528,4 |
| $\text{Sr}_2\text{As}_2\text{O}_7$ | – | – | – | 2557,3 |
| $\text{Ba}_2\text{As}_2\text{O}_7$ | – | – | – | 2551,8 |
| $\text{Mg}(\text{AsO}_3)_2$ | – | – | 1743,6 | 1673,2 |
| $\text{Ca}(\text{AsO}_3)_2$ | – | – | 1810,9 | 1752,7 |
| $\text{Sr}(\text{AsO}_3)_2$ | – | – | 1852,1 | 1765,6 |
| $\text{Ba}(\text{AsO}_3)_2$ | – | – | 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 $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ марки «ч.д.а.», а Na_3AsO_4 – по [10]. Полученный осадок $\text{NaCaAsO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 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 $\text{NaCaAsO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ определяли экспериментальным путем на основании измерения тепловых эффектов следующих реакций:



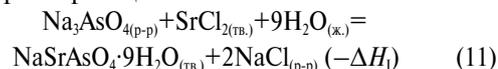
Наряду с тепловыми эффектами реакций (9, 10) для расчета $\Delta_f H^\circ(298,15)$ $\text{NaCaAsO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ были использованы $\Delta_f H^\circ(298,15)$ следующих веществ: $\text{Na}_3\text{AsO}_4(\text{тв.}) = -1535,5 \pm 9,6$; $\text{CaCl}_2(\text{тв.}) = -795,92 \pm 0,96$ [1], $\text{H}_2\text{O}(\text{ж.}) = -285,829 \pm 0,040$ [24], $\text{NaCl}(\text{р-р}, 2000 \text{H}_2\text{O}) = -407,275 \pm 0,25$ кДж/моль [25]. В связи с тем, что в справочнике [26] отсутствует величина $\Delta_f H^\circ(298,15)$, $\text{NaCl}, \text{р-р}, 2500 \text{H}_2\text{O}$, ее приравняли к $\Delta_f H^\circ(298,15)$, $\text{NaCl}, \text{р-р}, 2000 \text{H}_2\text{O}$, так как разница между ними должна быть пренебрежимо малой и ниже погрешностей тепловых эффектов реакций (9,10).

На основании вышеуказанных данных вычислена $\Delta_f H^\circ(298,15)$ $\text{NaCaAsO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}(\text{тв.})$, равная $-2789,5 \pm 10,2$ кДж/моль. По инкрементам [27] вычислены $S^\circ(298,15)$ и $C_p^\circ(298,15)$ $7\text{NaCaAsO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, 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 | $-\Delta H_{\text{раств.}}$, Дж | $-\Delta H_{\text{раств.}}$, кДж/моль | Навеска хлорида, г | $-\Delta H_{\text{вз.}}$, Дж | $-\Delta H_{\text{вз.}}$, 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 |
| $\Delta H_{\text{раств.}}^\circ = -71,13 \pm 1,42$ | | $\Delta H_{\text{вз.}}^\circ = -58,12 \pm 3,1$ | | | |

Стандартную энтальпию образования $\text{NaSrAsO}_4 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ 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 $\text{NaSrAsO}_4 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ при нагревании переходит в безводный NaSrAsO_4 , рентгенограмма которого удовлетворительно согласуется с данными [28].

Результаты калориметрических исследований приведены в табл. 3.

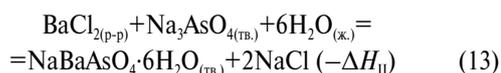
Для расчета $\Delta_f H^\circ(298,15)$ $\text{NaSrAsO}_4 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ кроме теплового эффекта реакции (11) и $\Delta_f H^\circ(298,15)$ вышеуказанных веществ использована стандартная теплота образования $\text{SrCl}_2(\text{тв.})$, равная $-834,33 \pm 0,71$ кДж/моль [1]. Таким образом, вычисленное значение $\Delta_f H^\circ(298,15)$ $\text{NaSrAsO}_4 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ 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 | $-\lg \text{IP}$ |
|----------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------------|------------------|
| 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., Пашинкин 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.