

МРНТИ 31.15.25

<https://doi.org/10.58805/kazutb.v.1.14-6>**Х.Б.Омаров^{1*}, Н.И.Копылов², З.Б.Абсаг³, С.К.Алдабергенова³ И.К.Кулумбетова³**¹Казахский университет технологии и бизнеса, г. Нур-Султан, Казахстан,²Институт химии твердого тела и механохимии Сибирского отделения
Российской Академии наук, Новосибирск, Россия,³Карагандинский университет им. Е.А.Букетова, г. Караганда, Казахстан
e-mail: homarov1963@mail.ru

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ Fe, As – СОДЕРЖАЩИХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ДИАГРАММ E-pH и ПАРЦИАЛЬНЫХ ДАВЛЕНИЙ

Аннотация. Изучена проблема загрязнения окружающей среды мышьяксодержащими отходами предприятий. Актуальность вопроса определяется ужесточением требований экологической безопасности существующих производств, принятием мер по улучшению и оздоровлению состояния окружающей среды вблизи предприятий горно-металлургического комплекса, в том числе, медного производства, необходимостью вывода такой примеси медного электролита, как мышьяк в экологически безопасных формах.

Исследования ученых сосредоточены на возможности применения соединений железа для осаждения мышьяка, как доступных и дешевых реагентов. Направляя эти опасные отходы на хранение или захоронение необходимо наряду с возможностью контакта с водой, учитывать и воздействие других факторов, к примеру – воздуха, состав которого постоянно загрязняется и может быть достаточно агрессивен. Это требует новых термодинамических данных для организации современных производственных процессов с целью утилизации мышьяка. В статье впервые представлены диаграммы потенциал E-pH и парциальных давлений железа, мышьяк-содержащих систем при стандартных условиях (25⁰C и 1 атм. общего давления). Анализ диаграмм E-pH и парциальных давлений позволил определить условия и направления прохождения химических реакций, формирования и устойчивости фаз с учетом термодинамического поведения химических элементов и их соединений. Установлены значения потенциала и pH, в пределах которых изучаемое соединение характеризуется стабильностью. Определены области существования арсената железа, рассмотрены химические и электродные реакции получения арсената железа из соединений железа и мышьяка. По итогам работы сделан вывод о возможности использования соединений железа для вывода мышьяка из растворов в виде труднорастворимого, устойчивого арсената железа и разработке на основе полученных данных эффективных технологических способов очистки и переработки медного электролита.

Ключевые слова: термодинамические системы, диаграммы, соединения мышьяка, соединения железа, арсенат железа.

Х.Б.Омаров^{1*}, Н.И.Копылов², З.Б.Әбсат³, С.Қ.Алдабергенова³, И.Қ.Кулумбетова³

¹ Қазақ технология және бизнес университеті, Нұр-Сұлтан қ., Қазақстан

²Ресей Ғылым академиясының Сібір бөлімі Қатты денелер химиясы және механикохимия институты, Новосибирск қ., Ресей, ³ Е.А.Бөкетов атындағы

Қарағанды университеті, Қарағанды қ, Қазақстан, e-mail: homarov1963@mail.ru

Е-рН МЕН ПАРЦИАЛДЫ ҚЫСЫМДАР ДИАГРАММАЛАРЫ НЕГІЗІНДЕ Fe,As -ҚҰРАМДЫ ЖҮЙЕЛЕРДІҢ ТЕРМОДИНАМИКАЛЫҚ ТАЛДАУЫ

Аңдатпа. Қәсіпорындарының құрамында мышьяк бар қалдықтармен қоршаған ортаны ластау мәселесі зерттелді. Мәселенің өзектілігі қолданыстағы өндірістердің экологиялық қауіпсіздігі талаптарын қатайтумен, тау-кен металлургия кешені, оның ішінде мыс өндірісі кәсіпорындарының жанындағы қоршаған ортаның жай-күйін жақсарту және сауықтыру жөнінде шаралар қабылдаумен, мышьяк сияқты мыс электролитінің қоспасын экологиялық қауіпсіз нысандарда шығару қажеттілігімен айқындалады. Ғалымдардың зерттеулері қол жетімді және арзан реагенттер ретінде мышьяқты тұндыру үшін темір қосылыстарын қолдану мүмкіндігіне назар аударады. Осы қауіпті қалдықтарды сақтауға немесе көмуге бағыттай отырып, сумен байланысу мүмкіндігімен қатар басқа факторлардың, мысалы, құрамы үнемі ластанған және агрессивті болуы мүмкін ауаның әсерін ескеру қажет. Бұл мышьяқты жою үшін заманауи өндірістік процестерді ұйымдастыру үшін жаңа термохимиялық деректерді қажет етеді. Мақалада алғаш рет стандартты жағдайлардағы (25⁰С және 1 атм. жалпы қысым) темір, мышьяк бар жүйелердің Е-рН және парциалды қысымының диаграммалары келтірілген. Е-рН және парциалды қысымдар диаграммаларын талдауы, химиялық элементтер мен олардың қосылыстарының термодинамикалық тәртібін ескере отырып, химиялық реакциялардың өту шарттары мен бағыттарын, фазалардың түзілуі мен тұрақтылығын анықтауға мүмкіндік берді. Зерттелетін қосылыс тұрақтылықпен сипатталатын потенциал және рН мәндері белгіленеді. Темір арсенатының бар болу аймақтары анықталды, темір мен мышьяк қосылыстарынан темір арсенатын алудың химиялық және электродтық реакциялары қарастырылды. Жұмыс нәтижелері бойынша мышьяқты ерітінділерден еримитін, тұрақты темір арсенаты түрінде шығару үшін темір қосылыстарын қолдану және мыс электролитін тазарту мен өндеудің тиімді технологиялық әдістері туралы алынған мәліметтер негізінде әзірлеу мүмкіндігі туралы қорытынды жасалды.

Түйінді сөздер: термодинамикалық жүйелер, диаграммалар, мышьяк қосылыстары, темір қосылыстары, темір арсенаты.

Kh.B.Omarov^{1*}, N.I.Kopylov², Z.B.Absat³, S.K.Aldabergenova³, I.K.Kulumbetova³

¹Kazakh University of Technology and Business, Nur-Sultan, Kazakhstan,

²Institute of Solid State Chemistry and Mechanochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia, ³Karaganda University named after E.A.Buketova, Karaganda, Kazakhstan, e-mail: homarov1963@mail.ru

THERMODYNAMIC ANALYSIS OF Fe, As – CONTAINING SYSTEMS BASED ON E– PH DIAGRAMS AND PARTIAL PRESSURES

Abstract. The problem of environmental pollution with arsenic containing waste from enterprises has been studied. The urgency of the issue is determined by the tightening of the environmental safety requirements of existing production facilities, the adoption of measures to improve and improve the state of the environment near the enterprises of the mining and metallurgical complex, including copper production, the need to remove such impurities of copper electrolyte as arsenic in environmentally safe forms. Scientists' research is focused on the possibility of using iron compounds for arsenic deposition as affordable and cheap reagents. Directing these hazardous wastes to storage or burial, it is necessary, along with the possibility of contact with water, to take into account the impact of other factors, for example, air, the composition of which is constantly polluted and can be quite aggressive. This requires new thermochemical data for the organization of modern production processes for the purpose of arsenic utilization. The article presents for the first time diagrams of the potential E-pH and partial pressures of iron, arsenic-containing systems under standard conditions (25°C and 1 atm. total pressure). An analysis of the E-pH diagrams and partial pressures made it possible to determine the conditions and directions for the passage of chemical reactions, the formation and stability of phases, taking into account the thermodynamic behavior of chemical elements and their compounds. The potential and pH values within which the studied compound is characterized by stability are established. The areas of existence of iron arsenate are determined, chemical and electrode reactions of obtaining iron arsenate from iron and arsenic compounds are considered. Based on the results of the work, it was concluded that it is possible to use iron compounds to remove arsenic from solutions in the form of a hard-to-dissolve, stable iron arsenate and to develop effective technological methods for cleaning and processing copper electrolyte based on the data obtained.

Keywords: thermodynamic systems, diagrams, arsenic compounds, iron compounds, iron arsenate.

Введение. При существующих схемах переработки, в условиях, требующих высокой комплектности использования сырья, продукты, содержащие мышьяк, циркулируют как между предприятиями различных производств (свинцовыми, цинковыми, медными и т.д.), так и внутри отдельных заводов

между основными переделами. Это приводит к накапливанию мышьяка в оборотах и как следствие – к нарушению технологии и потерям ценных металлов, загрязнению окружающей среды. Мышьяксодержащие материалы не находят широкого применения и направляются либо в хвостохранилища,

либо в отвалы, поэтому необходимым условием хранения или захоронения является их устойчивость к воздействиям окружающей среды (кислорода, различных окислителей и восстановителей, воды). Данной проблеме посвящены значительное количество работ, описанные авторами [1-3].

Несмотря на предложенные и внедренные способы очистки растворов от мышьяка, проблема не считается разрешенной. Ученые в поиске новых решений, в том числе путей модификации соединений железа [4-6], характеризующиеся как доступностью, так и дешевой, в качестве сорбентов мышьяка. Повышение эффективности такого подхода и дальнейшая оптимизация технологий очистки растворов от вредных примесей невозможны без глубокой проработки физико-химии составляющих их процессов.

Материалы и методы. Для определения направлений протекания процессов, последовательности окисления, области стабильности различных соединений и их соотношений в равновесных условиях использовали фундаментальные методы, описанные в работах [7-9]. Расчет диаграмм потенциал-рН проводился на основе методов, описанных в работах [7,10,11]. По методике [7] и общепринятых справочных данных [12-14] рассчитаны и построены диаграммы парциальных давлений.

Использование нами в работах [15-17] таких теоретических подходов, основанных на построении и анализе диаграмм потенциал-рН и парциальных давлений определило выбор направлений исследований, оптимальных условий их реализации, поведение целевых продуктов в соответствующих условиях. Основанные на данных термодинамических расчетов, результаты экспериментальных опытов позволили разработать новые способы [18-21] очистки и переработки медного электролита с применением

в качестве осадителей мышьяка и сурьмы, таких соединений как BaO , $Ba(OH)_2$, $BaCO_3$, PbO , $Pb(OH)_2$, $PbCO_3$, $Pb(CO_3)_2(OH)_2$.

Результаты и обсуждение. В соответствии с рисунком 1 и таблицей 1 область устойчивости воды на диаграмме Е-рН системы Fe-As- H_2O ограничивается линиями 1 и 2, выше линии 1 она соответствует окислительной среде, ниже линии 2 – восстановительной среде.

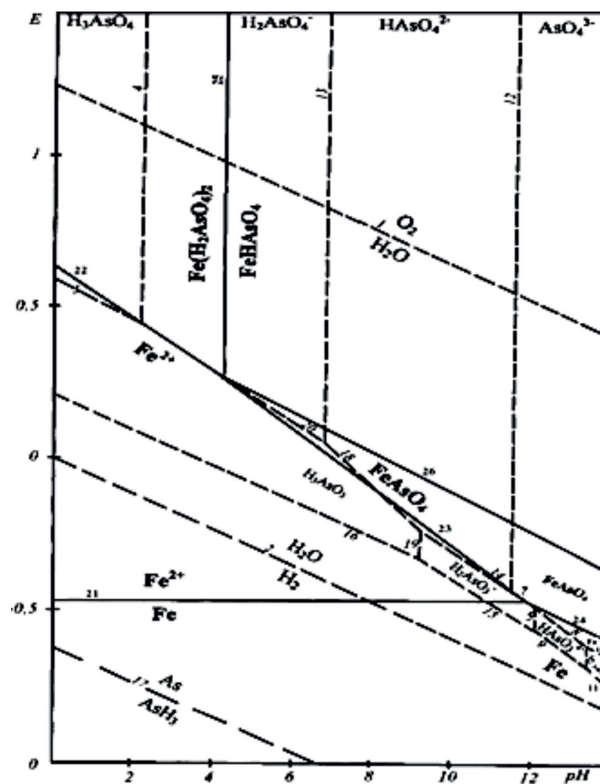


Рис. 1 – Диаграмма Е-рН системы Fe-As- H_2O

Также на диаграмме (рисунок 1) приведены условия образования и границы существования наиболее устойчивых мышьяк-содержащих соединений железа в кислой среде при стандартных условиях ($25^{\circ}C$ в водной среде и 1 атм. общего давления). Номера линий на диаграмме Е-рН соответствуют номерам химических электродных уравнений (в соответствии с таблицей 1).

Таблица 1

Уравнения реакций диаграммы E-pH системы Fe-As-H₂O

№ реакции	Химическая реакция	Электродная реакция
1	$H_{2O}_{(ж)} = O_{2(г)} + 4H^+_{(ж)} + 4\bar{e}$	$E = 1,23 - 0,059pH$
2	$H_{2(г)} = 2H^+_{(ж)} + 2\bar{e}$	$E = -0,059pH$
3	$H_3AsO_{3(ж)} + H_2O_{(ж)} = H_3AsO_{4(ж)} + 2H^+_{(ж)} + 2\bar{e}$	$E = 0,586 + 0,059pH$
4	$H_3AsO_{4(ж)} = H_2AsO_{4(ж)}^- + H^+_{(ж)}$	$lgK_p = -pH; pH = 2,19$
5	$H_2AsO_{3(ж)}^- = HAsO_{3(ж)}^{2-} + H^+_{(ж)}$	$lgK_p = -pH; pH = 12,10$
6	$HAsO_{3(ж)}^{2-} = H^+_{(ж)} + AsO_{3(ж)}^{3-}$	$lgK_p = lg[AsO_3^{3-}] - lg[HAsO_3^{2-}] - pH; pH = 13,41$
7	$H_2AsO_{3(ж)}^- + H_2O_{(ж)} = AsO_{4(ж)}^{3-} + 4H^+_{(ж)} + 2\bar{e}$	$E = 0,925] - 0,118pH$
8	$HAsO_{3(ж)}^{2-} + H_2O_{(ж)} = AsO_{4(ж)}^{3-} + 3H^+_{(ж)} + 2\bar{e}$	$E = 0,567 - 0,029lg[HAsO_3^{2-}] + 0,029lg[AsO_4^{3-}] - 0,088pH$
9	$As_{(т)} + 3H_2O_{(ж)} = HAsO_{3(ж)}^{2-} + 5H^+_{(ж)} + 3\bar{e}$	$E = 0,647 + 0,019lg[HAsO_3^{2-}] - 0,098pH$
10	$AsO_{3(ж)}^{3-} + H_2O_{(ж)} = AsO_{4(ж)}^{3-} + 2H^+_{(ж)} + 2\bar{e}$	$E = 0,170 + 0,029lg[AsO_4^{3-}] - 0,029lg[AsO_3^{3-}] - 0,059pH$
11	$As_{(т)} + 3H_2O_{(ж)} = AsO_{3(ж)}^{3-} + 6H^+_{(ж)} + 3\bar{e}$	$E = 0,912 + 0,0196lg[AsO_3^{3-}] - 0,118pH$
12	$HAsO_{4(ж)}^{2-} = H^+_{(ж)} + AsO_{4(ж)}^{3-}$	$lgK_p = -pH; pH = 11,51$
13	$H_2AsO_{4(ж)}^- = HAsO_{4(ж)}^{2-} + H^+_{(ж)}$	$lgK_p = -pH; pH = 6,79$
14	$H_2AsO_{3(ж)}^- + H_2O_{(ж)} = HAsO_{4(ж)}^{2-} + 3H^+_{(ж)} + 2\bar{e}$	$E = 0,585 + 0,029lg[HAsO_4^{2-}] - 0,029lg[H_2AsO_3^-] - 0,088pH$
15	$As_{(т)} + 3H_2O_{(ж)} = H_2AsO_{3(ж)}^- + 4H^+_{(ж)} + 3\bar{e}$	$E = 0,4085 + 0,0196lg[H_2AsO_3^-] - 0,078pH$
16	$As_{(т)} + 3H_2O_{(ж)} = H_3AsO_{3(ж)} + 3H^+_{(ж)} + 3\bar{e}$	$E = 0,226 + 0,0196lg[H_3AsO_3] - 0,059pH$
17	$AsH_{3(г)} = As_{(т)} + 3H^+_{(ж)} + 3\bar{e}$	$E = -0,6268 - 0,059pH$
18	$H_3AsO_{3(ж)} + H_2O_{(ж)} = HAsO_{4(ж)}^{2-} + 4H^+_{(ж)} + 2\bar{e}$	$E = 0,858 - 0,118pH$
19	$H_3AsO_{3(ж)} = H_2AsO_{3(ж)}^- + H^+_{(ж)}$	$lgK_p = -pH; pH = 9,24$
20	$H_3AsO_{3(ж)} + H_2O_{(ж)} = H_2AsO_{4(ж)}^- + 3H^+_{(ж)} + 2\bar{e}$	$E = 0,052 - 0,088pH$
21	$Fe_{(т)} = Fe^{2+}_{(ж)} + 2\bar{e}$	$E = -0,44 + 0,03lg[Fe^{2+}]$
22	$Fe^{2+}_{(ж)} + 2H_3AsO_{3(ж)} + 2H_2O_{(ж)} = Fe(H_2AsO_4)_{2(т)} + 6H^+_{(ж)} + 4\bar{e}$	$E = 0,63 + 0,088pH$

23	$Fe^{2+}_{(ж)} + H_3AsO_{3(ж)} + H_2O_{(ж)} = FeAsO_{4(т)} + 5H^+_{(ж)} + 3\bar{e}$	$E = 0,715 - 0,098pH$
24	$Fe_{(т)} + As_{(т)} + 4H_2O_{(ж)} = FeAsO_{4(т)} + 8H^+_{(ж)} + 8\bar{e}$	$E = 0,23 - 0,059pH$
25	$Fe(H_2AsO_4)_{2(т)} = FeHAsO_{4(т)} + H_2AsO_4^-_{(ж)} + H^+_{(ж)}$	$lgKp = lg[H_2AsO_4^-] + pH;$ $pH = 4,23$
26	$FeHAsO_{4(т)} = FeAsO_{4(т)} + H^+_{(ж)} + \bar{e}$	$E = 0,54 - 0,059pH$

На диаграмме E-pH системы Fe-As-H₂O уточнено значение pH среды, при котором возможно образование арсената железа: его устойчивость проявляется при значениях pH выше 4,23. В этих условиях присутствует и FeHAsO₄, который взаимодействуя с H₂AsO₄⁻ может привести к образованию дигидроарсената железа Fe(H₂AsO₄)₂ (уравнение 25).

Условия образования наиболее устойчивых мышьяксодержащих соединений железа определены на основе анализа диаграммы парциальных давлений системы Fe-O₂-SO₂-As₂ (рисунок 2). На рисунке выше линии *a* находится окислительная область, ниже линии *b* – восстановительная область.

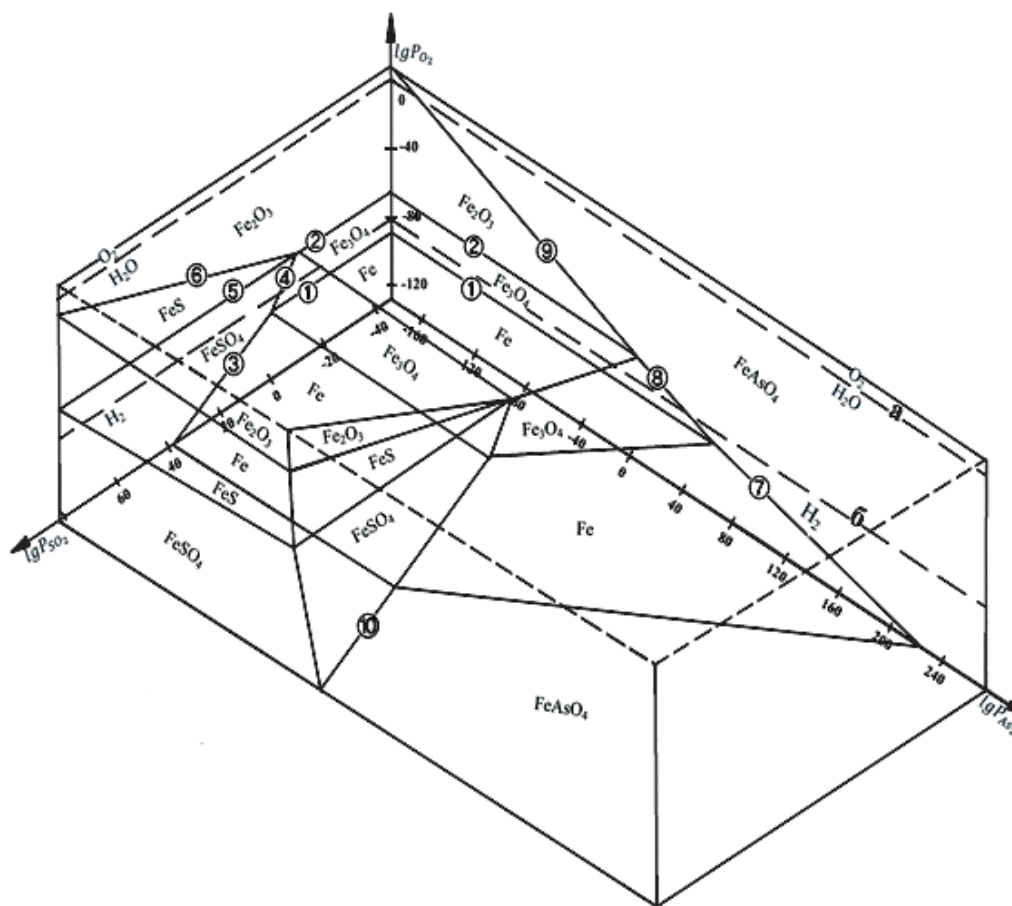


Рис. 2 – Диаграмма парциальных давлений системы Fe-O₂-SO₂-As₂

Расчет и построение диаграммы парциальных давлений системы Fe-O₂-SO₂-As₂ основаны на данных, представленных в таблице 2, поэтому номера линий на диаграмме соответствуют номерам химических уравнений, представленных в данной таблице.

Взаимодействия между оксидами и сульфатом железа охарактеризованы на плоскости lgP_{SO₂}-lgP_{O₂}, между оксидами и арсенатом железа – на плоскости lgP_{O₂}-lgP_{As₂}.

Образование магнетита (Fe₃O₄) (реакция 1) и сульфата железа (FeSO₄) по реакции 4 являются результатом взаимодействия железа с кислородом и оксидом серы, соответственно. Арсенат железа FeAsO₄ – продукт взаимодействия железа с газообразным мышьяком (реакция 8). На диаграмме парциальных давлений, очевидно, что FeAsO₄ – стабильное соединение, охватывающее восстановительную, водную и окислительную области.

Таблица 2
Уравнения реакций диаграммы парциальных давлений системы Fe-O₂-SO₂-As₂

№ реакции	Уравнение реакции	ΔG°, ккал /моль	lgP _{O₂}	lgP _{SO₂}	lgP _{As₂}
1	3Fe+2O ₂ =Fe ₃ O ₄	-242,4	-88,9	-	-
2	2Fe ₃ O ₄ +0,5O ₂ =3Fe ₂ O ₃	-46,5	-68,2	-	-
3	Fe+SO ₂ +O ₂ =FeSO ₄	-126,55	-92,78	-92,78	-
4	Fe ₃ O ₄ +3SO ₂ +O ₂ =3FeSO ₄	-137,244	-100,62	-33,54	-
5	FeS+2O ₂ =FeSO ₄	-174,98	-64,4	-	-
6	Fe ₂ O ₃ +3SO ₂ =2FeS+3,5O ₂	273,964	-57,386	100,43	-
7	2Fe+As ₂ +4O ₂ =2FeAsO ₄	-405,806	-74,38	-	-297,51
8	2Fe ₃ O ₄ +3As ₂ +8O ₂ =6FeAsO ₄	-732,618	-67,14	-	-179,04
9	Fe ₂ O ₃ +As ₂ +2,5O ₂ =2FeAsO ₄	-228,71	-67,07	-	-167,67
10	2FeSO ₄ +As ₂ +2O ₂ =2FeAsO ₄ +2SO ₂	-152,71	-	56,279	-35,519

На диаграмме (рисунок 2) реакция 10 разграничивает области устойчивости сульфата железа и арсената железа, согласно которой область устойчивости FeAsO₄ с возрастанием lgP_{As₂} уверенно возрастает.

Выводы. Результатами исследований определены области и формы существования мышьяка и его соединений в стандартных условиях (25°C в водной среде и 1 атм. общего давления). В окислительной области мышьяк преимущественно находится в виде мышьяковой кислоты и ее производных. Производные мышьяковой кислоты весьма стабильны и в области устойчивости

воды. Восстановительная область характеризуется присутствием твердого мышьяка и арсина.

Проведенный анализ, полученных термодинамических данных о Fe, As-содержащих системах, свидетельствует об обширной области стабильности арсената железа FeAsO₄. Наряду с водной и восстановительной, его присутствие возможно и в окислительной среде.

Данные исследований подтверждают возможность применения железосодержащих соединений в качестве осадителя мышьяка в форме арсената железа из водных растворов.

Литература

1. Набойченко С.С., Мамяченков С.В., Карелов С.В. Мышьяк в цветной металлургии. Екатеринбург: Изд. УрО РАН. 2004. -240с.
2. Омаров Х.Б., Жарменов А.А., Сагиндыкова З.Б. Мышьяк в гидрохимических процессах медного производства. Караганда: Изд-во КарГУ. 2007. -219с.
3. Копылов Н.И., Каминский Ю.Д. Мышьяк // Под редакцией Г.А.Толстикова. Новосибирск: Сиб. унив. изд-во. 2004. -367с.
4. Селиверстов А.Ф., Лагунова Ю.О., Кулюхин С.А., Ершов Б.Г. Исследование сорбции мышьяка на неорганических сорбентах, модифицированных соединениями железа // Журнал прикладной химии. 2017. Т.90. Вып. 3. С. 332-339.
5. Iorio E.D., Colombo C., Cheng Zh. Characterization of magnetite nanoparticles synthesized from Fe (II) / nitrate solutions for arsenic removal from water // Journal of Environmental Chemical Engineering. 2019. V. 7. I. 2. 102986.
6. Torasso N., Vergara-Rubio A., Rivas-Rogas P. et al. Enhancing arsenic adsorption via excellent dispersion of iron oxide nanoparticles inside poly (vinyl alcohol) nanofibers // Journal of Environmental Chemical Engineering. 2021. V. 9. I. 1. 104664.
- 7 Гаррелс Р.И., Крайст И.А. Растворы, минералы, равновесия. М.: Мир. 1968. – 386 с.
8. Касенов Б.К., Алдабергенов М.К., Пашинкин А.С. Термодинамические методы в химии и металлургии. Алматы: Рауан. 1994. -126 с.
9. Касенов Б.К., Жамбеков и др. Оценка термодинамических функций арсенатов и висмутитов щелочноземельных и некоторых переходных (3d-, 4f) металлов // Физическая химия. 1998. Т.72. №2. С. 376-379.
10. Жамбеков М.И. Е-рН диаграмма системы As-H₂O // Вестник КарГУ. 1997. № 3. С. 106-114.
11. Фрейд М.Х., Александрова А.Н., Зятькова Л.Ф. Исследования механизма электрохимического растворения карбида молибдена на основе диаграммы Пурбэ // Прикладная химия. 1984. Т. LVII. №2. С.270-275.
12. Глушко В.П. Термические константы веществ. М.: Химия. 1970. Вып. 4. -502 с.
13. Карапетьянц М.Х., Карапетьянц М.Л. Основные термодинамические константы неорганических и органических веществ. М: Химия. 1968. – 469 с.
- 14 Гурвич Л.В., Вейц И.В., Медведев В.А. и др. Термодинамические свойства индивидуальных веществ М.: Наука. 1981. Т.3. – 400с.
15. Абсат З.Б., Сагиндыкова З.Б. Омаров Х.Б. и др. Термодинамический анализ взаимодействий в системе Ba(AsO₂)₂-Ba₃(AsO₄)₂-H₂O на основе диаграммы Е-рН // Вестник ЕНУ. Серия естественных наук. 2005. №2(42). С.71-77.
16. Абсат З.Б., Сагиндыкова З.Б., Омаров Х.Б. и др. Термодинамический анализ взаимодействий в системе Ва-О₂-SO₂-As₂ // Вестник КарГУ. Серия Химия. 2003. №1(29). С.52-55.
17. Абсат З.Б., Сагиндыкова З.Б., Байкенов М.И., Омаров Х.Б., Дюсембаева С.Е., Султанова Л.М. Анализ взаимодействий в системе Pb-O₂-SO₂-As₂ на основе диаграммы парциальных давлений //Вестник КазНУ им. Аль-Фараби. Сер. Химическая. 2002. № 4. С. 67-69.
18. Омаров Х.Б., Сагиндыкова З.Б., Абсат З.Б., Алдабергенова С.К. Области устойчивости арсенатов свинца в координатах потенциал-рН // Вестник КарГУ. Серия Химия. 2007. №2(46). С.36-39.

19. Омаров Х.Б. Жарменов А.А., Султанова Л.М. и др. // Способ переработки медного электролита. Авторское свидетельство № 15322. 2005. Опубл. в Бюл. № 1.
20. Омаров Х.Б. Сагиндыкова З.Б., Абсат З.Б., Байкенов М.И. // Способ очистки медного электролита от мышьяка. Авторское свидетельство № 14686. 2007. Опубл. в Бюл. № 11.
21. Омаров Х.Б. Сагиндыкова З.Б., Абсат З.Б. и др. // Способ осаждения мышьяка из маточных растворов медного производства. Авторское свидетельство № 21002. 2009. Опубл. в Бюл. №3.

References

1. Nabojchenko S.S., Mamyachenkov S.V., Karelov S.V. Mysh'yak v cvetnoj metallurgii. Ekaterinburg: Izd-vo URO RAN. 2004. -240s.
2. Omarov Kh.B., Zharmenov A.A., Sagindykova Z.B. Mysh'yak v gidrokhimicheskikh processakh mednogo proizvodstva. Karaganda: Izd-vo KaRGU. 2007. -219s.
3. Kopylov N.I., Kaminskij YU.D. Mysh'yak // Pod redakciej G.A.Tolstikova. Novosibirsk: Sib. univ. izd-vo. 2004. -367s.
4. Seliverstov A.F., Lagunova YU.O., Kulyukhin S.A., Ershov B.G. Issledovanie sorbcii mysh'yaka na neorganicheskikh sorbentakh, modificirovannykh soedineniyami zheleza // Zhurnal prikladnoj khimii. 2017. T.90. Vyp. 3. S. 332-339.
5. Iorio E.D., Colombo C., Cheng Zh. Characterization of magnetite nanoparticles synthesized from Fe (II) / nitrate solutions for arsenic removal from water // Journal of Environmental Chemical Engineering. 2019. V. 7. I. 2. 102986.
6. Torasso N., Vergara-Rubio A., Rivas-Rogas P. et al. Enhancing arsenic adsorption via excellent dispersion of iron oxide nanoparticles inside poly (vinyl alcohol) nanofibers // Journal of Environmental Chemical Engineering. 2021. V. 9. I. 1. 104664.
7. Garrels R.I., Kraist I.A. Rastvory, mineraly, ravnovesiya. – M.: Mir. 1968. – 386 s.
8. Kasenov B.K., Aldabergenov M.K., Pashinkin A.S. Termodinamicheskie metody v khimii i metallurgii. Almaty: Rauan, 1994. -126 s.
9. Kasenov B.K., Zhambekov i dr. Ocenka termodinamicheskikh funkcij arsenatov i vismutitov shchelochnozemel'nykh i nekotorykh perekhodnykh (3d-, 4f) metallov // Fizicheskaya khimiya. 1998. T.72. №2. S. 376-379.
10. Zhambekov M.I. E-RN diagramma sistemy As-H₂O // Vestnik KaRGU. 1997. № 3. S. 106-114.
11. Frejd M.KH., Aleksandrova A.N., Zyat'kova L.F. Issledovaniya mekhanizma ehlektrokhimicheskogo rastvorenija karbida molibdena na osnove diagrammy Purbeh // Prikladnaya khimiya. 1984. T. LVII. №2. S.270-275.
12. Glushko V.P. Termicheskie konstanty veshchestv. M.:Khimiya. 1970. Vyp. 4. -502 s.
13. Karapet'yanc M.Kh., Karapet'yanc M.L. Osnovnye termodinamicheskie konstanty neorganicheskikh i organicheskikh veshchestv. M: Khimiya. 1968. – 469 s.
14. Gurvich L.V., Vejc I.V., Medvedev V.A. i dr. Termodinamicheskie svoystva individual'nykh veshchestv M.: Nauka. 1981. T.3. – 400s.
15. Absat Z.B., Sagindykova Z.B. Omarov KH.B. i dr. Termodinamicheskij analiz vzaimodejstvij v sisteme Ba(AsO₂)₂-Ba₃(AsO₄)₂-H₂O na osnove diagrammy E-pH // Vestnik ENU. Seriya estestvennykh nauk. 2005. №2(42). S.71-77.

16. Absat Z.B., Sagindykova Z.B., Omarov K.H.B. i dr. Termodinamicheskij analiz vzaimodejstvij v sisteme Ba-O₂-SO₂-As₂ // Vestnik KaRGU. Seriya Khimiya. 2003. №1(29). S.52-55.
17. Absat Z.B., Sagindykova Z.B., Bajkenov M.I., Omarov K.H.B., Dyusembaeva S.E., Sultanova L.M. Analiz vzaimodejstvij v sisteme Pb-O₂-SO₂-As₂ na osnove diagrammy parcial'nykh davlenij // Vestnik KaZNU im. Al'-Farabi. Ser. Khimicheskaya. 2002. № 4. S. 67-69.
18. Omarov Kh.B., Sagindykova Z.B., Absat Z.B., Aldabergenova S.K. Oblasti ustojchivosti arsenatov svinca v koordinatakh potencial-RN // Vestnik KaRGU. Seriya Khimiya. 2007. №2(46). S.36-39.
19. Omarov Kh.B., Zharmenov A.A., Sultanova L.M. i dr. // Sposob pererabotki mednogo ehlektrolita. Avtorskoe svidetel'stvo № 15322. 2005. Opubl. v Byul. № 1.
20. Omarov Kh.B., Sagindykova Z.B., Absat Z.B., Bajkenov M.I. // Sposob ochistki mednogo ehlektrolita ot mysh'yaka. Avtorskoe svidetel'stvo № 146862007. Opubl. v Byul. № 11.
21. Omarov Kh.B., Sagindykova Z.B., Absat Z.B. i dr. // Sposob osazhdeniya mysh'yaka iz matochnykh rastvorov mednogo proizvodstva. Avtorskoe svidetel'stvo № 21002. 2009. Opubl. v Byul. №3.