

Шабданова Э.А., Тунгучбекова Ж.Т., Самбаева Д.А., Маймеков З.К.

**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ  $H_2C_4H_4O_6 - Sb_2S_3 - H_2O$  И ОПРЕДЕЛЕНИЕ СПЕКТРА КОНЦЕНТРАЦИОННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СУРЬМОСОДЕРЖАЩИХ КОМПОНЕНТОВ В ГАЗОВОЙ ФАЗЕ**

*E.A. Shabdanova, Zh.T. Tunguchbekova, D.A. Sambaeva, Z.K. Maimekov*

**PHYSICO-CHEMICAL MODELING OF THE SYSTEM  $H_2C_4H_4O_6 - Sb_2S_3 - H_2O$  AND THE DEFINITION OF THE SPECTRUM OF THE CONCENTRATION DISTRIBUTION ARMONIZARII COMPONENTS IN THE GAS PHASE**

УДК:622.765+665.75

*В статье приведены спектры концентрационного распределения сурьмосодержащих компонентов в системе  $H_2C_4H_4O_6 - Sb_2S_3 - H_2O$  в пределах изменения температуры от 285 до 1005K.*

*The article shows the spectra of the concentration distribution of components in the system antimony containing ( $H_2C_4H_4O_6 - Sb_2S_3 - H_2O$ ) temperature varies from 285 to 1005K.*

В настоящее время объектами современных экспериментальных и теоретических научных исследований в области химии сурьмы и редких металлов становятся гетерогенные системы, включающие одновременно газовые, жидкие и твердые компоненты все более усложненной фазовой структурой. То же относится к технологическим системам, природным и промышленным источникам сурьмосодержащего сырья, материалам и продуктам химических производств. Многообразие возникающих при этом задач отражается в направлении развития термодинамических методов исследования, среди которых в настоящее время доминируют расчеты, основанные на минимизации энергии Гиббса и при максимуме энтропии системы. Здесь следует отметить, что строгий термодинамический анализ равновесных свойств сложных многокомпонентных гетерогенных систем требует значительной и точной исходной информации об их свойствах. Результаты расчетов, основанных на модельных представлениях, эмпирических закономерностях дают конкретные численные значения термодинамических величин для отдельных типов систем, что, безусловно, весьма важно для экспериментальных исследований. Поэтому актуальность исследований, основанных на строгом термодинамическом подходе, определяется, в первую очередь, их фундаментальным характером, возможностью развития на их базе термодинамической теории и новых расчетных методов.

В связи с изложенным выше в последние годы в научной литературе имеются работы, посвященные к термодинамическим исследованиям по переработке сурьму-мышьяксодержащего полиметаллического сырья сульфидовозгонным способом [1]. Для термодинамических расчетов, позволяющих косвенно определить характер и направление реакций,

протекающих в процессе сульфидирующего обжига, в [1]

применялась развернутая формула Гиббса-Гельмгольца ( $\Delta G^0 T = \Delta H^0 T - T \Delta S^0 T$ ) позволяющая произвести расчет изменения свободной энергии Гиббса и констант равновесия химических реакций в зависимости от изменения температуры. Исходными данными для расчетов были начальная температура, температуры полиморфных превращений, сульфидирующего обжига и конечная температура (773-1273 K). Учитывались также значения энтальпии и стандартных энтропий компонентов реакций, коэффициенты a, b, c в уравнениях теплоемкостей всех компонентов реакций с учетом их агрегатных состояний, значения энтальпии и энтропии при полиморфных превращениях и при плавлении всех компонентов реакции [2]:

$$\Delta H^0_T = \Delta H^0_{298} + \int_{298}^{T_{пр}} C_{P_1} dT + \Delta H^0_{пр} + \int_{T_{пр}}^{T_{пл}} C_{P_1} dT + \Delta H^0_{пл} + \int_{T_{пл}}^T C_{P_1} dT$$

$$\Delta H^0_T = \Delta H^0_{298} + \int_{298}^{T_{пр}} C_{P_2} dT + \Delta H^0_{пр} + \int_{T_{пр}}^{T_{пл}} C_{P_2} dT + \Delta H^0_{пл} + \int_{T_{пл}}^T C_{P_2} dT$$

$$S^0_T = S^0_{298} + \int_{298}^{T_{пр}} \frac{C_{P_1}}{T} dT + \Delta S^0_{пр} + \int_{T_{пр}}^{T_{пл}} \frac{C_{P_1}}{T} dT + \Delta S^0_{пл} + \int_{T_{пл}}^T \frac{C_{P_1}}{T} dT$$

где,  $T_{пр}$  - температура полиморфного превращения;  $T_{пл}$  - температура плавления;  $C_{P1}$ ,  $C_{P2}$ ,  $C_{P3}$  теплоемкости в соответствующих температурных интервалах;  $\Delta H^0_{пр}$  - изменение энтальпии при полиморфном превращении;  $\Delta S^0_{пр}$  - изменение энтропии при полиморфном превращении;  $\Delta H^0_{пл}$  - изменение энтальпии при плавлении;

Расчетные значения изобарно-изотермических потенциалов предполагаемых реакций взяты из справочных данных [2]. В результате термодинамических анализов установлено, что при взаимодействии окисленных соединений сурьмы, образование которых возможно в результате взаимодействия исходного сульфида сурьмы с адсорбированным кислородом при загрузке исходной навески, с парами элементной серы в исследуемом интервале температур, образуется летучий сульфид сурьмы  $Sb_2S_3$ . При этом выявлен ступенчатый характер сульфидирования окисленных соединений сурьмы парами элементной серы. Из полученных результатов следует, что сульфи-

дированием серой можно удалить мышьяк в виде сульфидов при относительно низких температурах из мышьяксодержащего полиметаллического сырья.

В работе [3] приведены термодинамические константы отдельных реакций галогенирования сурьмосодержащих материалов:  $Sb_2S_3 + 6Fe^{3+} + 6Cl^- = 2SbCl_3 + 6Fe^{2+} + 3S$ ,  $AF = +196,98$  кДж.гК. = -144,42 :  $Sb_2S_3 + 3H_2O + 6HCl = 2SbCl_3 + 3S + 6H_2O$ ,  $AF = -756,78$  кДж,  $IgK = 554,81$ ;  $Sb_2S_3 + 3Cl_2 = 2SbCl_3 + 3S$ ,  $AF = -536,35$  кДж,  $IgK = 393,22$ ;  $Sb_2S_3 + 6Cl_2 = 2SbCl_3 + 3S_2Cl_2$ ,  $AF = -631,11$  кДж,  $IgK = 462,7$ ;  $Fe_2O_3 + 6HF = 2FeF_3 + 3H_2O$ ,  $Sb_2S_3 + 6FeF_3 = 2SbF_3 + 6FeF_2 + 3S$ ,  $Sb_2S_3 + Fe, (SO_2)_3 + 4FeF_3 + 6HF = 2SbF_3 + 6FeF_2 + 3S + 3H_2SO_4$ ;  $Sb_2S_3 + 2SbF_5 = 5SbF_3 + 3S$ ;  $Sb_2S_3 + 6Fe(BF_4)_3 = 2Sb(BF_4)_3 + 6Fe(BF_4)_2 + 3S$ ;  $2Sb(BF_4)_3 + 6Fe(BF_4)_2 = 2Sb + 6Fe(BF_4)_3$ ;  $Sb_2S_3 + 3S_2Cl_2 = 2SbCl_3 + 9S$ ;  $ftsl + 3SCl_2 = 2SbCl_3 + 6S$ ;  $Sb_2S_3 + 5S_2Cl_2 = 2SbCl_5 + 13S$ ;  $Sb_2S_3 + 5SCl_2 = 2SbCl_5 + 8S$ . Из приведенных реакций, величин стандартной свободной энергии и констант равновесия следует, что наиболее предпочтительно использовать в качестве растворителя  $FeF_3$ ,  $FeCl_3$ ,  $SbCl_5$  и хлор.

Термодинамика сульфидирования сурьмосодержащего полиметаллического сырья с элементарной серой при различном составе газовой фазы и температуры процесса изучены в работе [4]. Здесь определены наиболее вероятные реакции, протекающие при обжиге. Исходными данными для расчетов были начальная температура, температуры полиморфных превращений, температура в интервале 773-1273 К. В результате термодинамических анализов установлено, что при взаимодействии окисленных соединений сурьмы, образование которых возможно в результате взаимодействия исходного сульфида сурьмы с адсорбированным кислородом при загрузке исходной навески, с парами элементарной серы в исследуемом интервале температур, образуется летучий сульфид сурьмы  $Sb_2S_3$ . При этом выявлен ступенчатый характер сульфидирования окисленных соединений сурьмы парами элементарной серы. Из полученных результатов следует, что сульфидированием серой можно удалить мышьяк в виде сульфидов при относительно низких температурах из мышьяксодержащего полиметаллического сырья.

Результаты термодинамического моделирования процессов двухстадийной переработки сульфидного свинцового сырья автогенной плавкой с последующим обеднением «тяжелого» плавильного шлака, положенные в основу разработанной аппаратурно-технологической схемы рассмотрены в работе [5]. Для достижения поставленной цели осуществлено термодинамическое моделирование процессов двухстадийной переработки свинцового сырья, включающих автогенную плавку свинцового сырья и обеднение шлака. Отмечено, что развитие методики термодинамического расчета процессов, позволяет сделать обоснованный выбор двухстадийной аппаратурно-технологической схемы переработки свинцового концентрата, определить основные технологические показатели переделов плавки и обеднения шлаков. В основе метода расчета равновесных

параметров в данном случае служил поиск минимума энергии Гиббса системы. В зависимости от постановки задачи, в составе «комплекса или отдельно поставляются базы данных с свойствах индивидуальных веществ и реальных растворов; каждая база данных соответствует некоторой группе веществ (оксиды, соли, сплавы меди, благородные металлы и т. п.) или предметной области производства. В качестве основной модели металлического расплава (чернового свинца) использовался раствор Pb-liq. В качестве модели шлака - раствор ASlag. Кроме того, для учета шпинелей в составе шлака в виде отдельной фазы использована модель ASpinel. Лабораторные эксперименты, проведенные для проверки адекватности термодинамических расчетов, показали высокую сходимость результатов и полностью подтвердили правильность расчетов. На основе термодинамических исследований восстановительной стадии процесса переработки свинцового сырья установлены зависимости распределения различных соединений свинца и цинка по продуктам плавки от удельного расхода твердого восстановителя и температуры, которые позволяют рассчитать основные параметры ведения процесса восстановления, обеспечивающие максимальные извлечения свинца в металлическую, а цинка в шлаковую фазы. Экспериментальными исследованиями подтверждены результаты термодинамических расчетов, показывающие: невозможность получения в одну стадию металлического свинца с низким содержанием серы и отвальных по свинцу шлаков; распределение свинца и цинка между продуктами процесса двухстадийной переработки сульфидного свинцового сырья. Изучение процессов, протекающих в свинецсодержащей шихте, показало, что непосредственное восстановление сульфида свинца углеродом или оксидом углерода при температурах до 1400°C невозможно. В этих условиях величина  $\Delta G$  реакций положительная. Поэтому в свинцовой промышленности используется косвенный путь получения металлического свинца.

Анализ литературных данных показал, что практически отсутствуют термодинамические исследования, посвященные к изучению сурьмосодержащих соединений в гетерогенных сложных системах, включающие одновременно газовые, жидкие и твердые фазы. С учетом этих положений в настоящей работе сначала проанализированы литературные источники по разработке физико-химических и термодинамических основ комплексной переработки некондиционных руд и вторичного сырья, содержащих сурьму и редких металлов, и по результатам этих работ рассмотрены термодинамические и энергетические характеристики гетерогенной системы типа:  $H_2C_4H_4O_6 - Sb_2S_3 - H_2O$  при различных температурных режимах, а именно в пределах изменения температуры от 285 до 1005 К и найдены спектры концентрационного распределения сурьмы содержащих компонентов в газовой фазе (рис.1 и табл. 1-3). При этом методическую основу расчетных параметров составили модели, для кото-

рых предусматривается возможность образования газообразных веществ, электронейтральных и ионизированных компонентов. Равновесные данные системы определены путем решения задачи о нахождении экстремума энтропии [6]. В базу данных термодинамических свойств индивидуальных веществ включены информации о винной кислоте ( $H_2C_4H_4O_6$ ), сульфиде сурьмы ( $Sb_2S_3$ ) и воды ( $H_2O$ ). Химический состав рассматриваемой системы включил элементы (%): Н- 50,33; С- 8,88; О- 31,828; Sb-1,96; S- 2,944.

В табл.2 приведены равновесные составы и концентрации компонентов

( $H, H_2, OH, H_2O, S, S_2, S_3, S_4, S_5, SO, SO_2, S_2O, SH, H_2S, HS, SOH, H_2SO, Sb(c), Sb, Sb_2, Sb_3, Sb_4, SbO, Sb_2O_3(c), Sb_4O_6, SbH, SbH_3, SbS, Sb_2S_3(c), C(c), CO, CO_2, CH_3, CH_4, C_2H_2, C_2H_4, C_2H_6, C_3H_8$  снo,  $CH_2O, CH_2O_2, C_2H_4O_2, C_3H_6O, CS, CS_2, COS$ , образующихся в системе  $H_2C_4H_4O_6-Sb_2S_3-H_2O$  (1:1:1) при  $P = 0,1$  МПа, а на

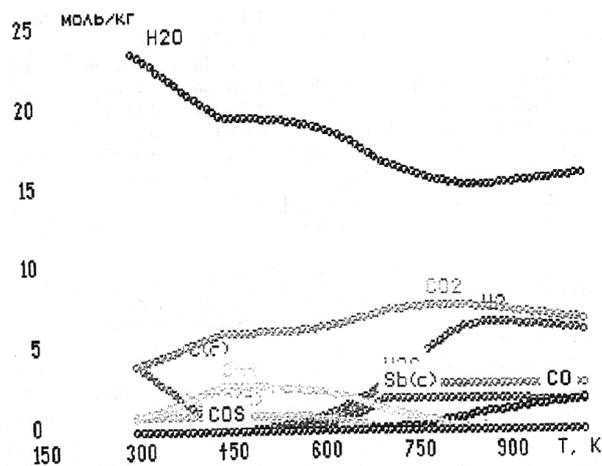


Рис.1. Равновесные составы и концентрации компонентов, образующихся в системе  $H_2C_4H_4O_6-Sb_2S_3-H_2O$  (1:1:1) при  $P=0,1$  МПа

Таблица 1

Изменение свойств системы:  $H_2C_4H_4O_6-Sb_2S_3-H_2O$  (1:1:1) при  $P=0,1$  МПа,  $T=285-1005$ К

T, K	$V \cdot 10^2, m^3/kg$	$S, кДж/(кг \cdot K)$	$I, кДж/кг$	$U, кДж/кг$	$C_p \cdot 10^4, кДж/(кг \cdot K)$	$Mu \cdot 10^5, Па \cdot с$	$Lt \cdot 10^5, Вт/(кг \cdot K)$	$Pr \cdot 10^3$
285	67,526	5,754	-7542,12	-7539	13301,3	1,03	2368,6	682,168
385	91,235	6,163	-7406,14	-7426,72	13764,3	1,46	4596,3	504,877
485	115,269	6,473	-7271,72	-7316,13	14222,4	1,87	18318,4	188,1
585	142,008	6,825	-7082,29	-7151,92	26306,9	2,26	67323,3	88,139
685	178,985	7,434	-6693,09	-6794,17	51277,1	2,68	107638	90,154
785	216,622	7,868	-6374,34	-6508,69	31872,5	3,05	90156,8	138,999
885	250,157	8,162	-6129,87	-6295,75	18605,6	3,38	11101,7	705,556
985	279,085	8,393	-5916,31	-6110,92	17249,4	3,7	12140,5	633,503
1005	284,85	8,427	-5881,68	-6082,02	17392,2	3,77	12336,7	631,487

Таблица 1

Равновесные составы и концентрации компонентов (моль/кг), образующихся в системе:  $H_2C_4H_4O_6-Sb_2S_3-H_2O$ (1:1:1) при  $P=0,1$  МПа,  $T=285-1005$  К

Состав	Температура, К								
	285	385	485	585	685	785	885	985	1005
H	1.93E-22	1,93E-22	2,79E-21	7,68E-17	1.04E-13	2J4E-11	1,07E-09	2J2E-08	3.79E-08
H <sub>2</sub>	0,000086	0,009347	0,147299	0,906304	2,82486	5,81946	6,73563	6,33203	6,2405
OH	1,93E-22	1,93 E-22	1,93E-22	1,48E-20	3,92E-17	1,52E-14	1,99E-12	1.1E-10	2,23E-10
H <sub>2</sub> O	23,688	20,7705	19,5254	18,9234	16,8062	15,5593	15,4571	15,9267	16,0223
I	1,93E-22	1,93E-22	1,93E-22	4,09E-21	7,54E-17	3,48E-14	6,01E-12	4,33E-10	9,23 E-10
S <sub>2</sub>	1,93E-22	1,62E-20	8,62E-15	1,061-10	8,47E-08	1,13E-06	0,000019	0,000255	0,000406
I'	1,93E-22	1,93E-22	7,93E-21	1,34E-15	6,64 E-12	1,05E-10	1,05E-10	7,66E-08	1,37E-07
S <sub>4</sub>	1,93 E-22	1,93E-22	i,93E-22	9,36E-20	1,51 E-15	1,78E-14	6,24E-13	2,2E-11	4,19E-11
S <sub>5</sub>	K93E-22	1,93 E-22	1,93 E-22	2,8E-22	1,69E-17	1,63E-16	7,57E-15	4,03 E-13	8,29E-13
so	1,93 E-22	1,93 E-22	7,03 E-22	3,09E-17	6,7E-14	7,27E-12	6,57E-10	6,57E-10	7J5E-08
so <sub>2</sub>	1,93 E-22	7,12E-19	5,72E-15	3,39E-12	3,77E-10	5,2E-09	1,54E-07	4,22E-06	7,67E-06
Sj()	1,93 E-22	1,93E-22	5,79E-21	2,21 E-16	4,24E-13	1,28E-11	6,48E-10	2,63E-08	5J2E-08
SH	1,93E-22	4,2E-21	L64E-15	1J3E-11	5,52E-09	1,58E-07	2,58E-06	0,000026	3,91 E-05

H <sub>2</sub> S	1,93E-05	0,000647	0,028803	0,482879	2,9117.1	2,92707	2,91585	2,90395	2.90112
HSO	1,93E-22	1,93E-22	1,93E-22	1,93E-22	3,18E-20	U21E-17	2,37E-15	2,16E-13	4,81 E-13
SOH	1,93E-22	1,93E-22	1,93 E-22	HH	1.59E-16	Г.97E-14	• 1.6E-12	7.23E-11	1,42E-10
H <sub>2</sub> SO	1,93E-22	1,93 E-22	1,93 E-22	L98E-19	2,07 E-16	1,14E-14	4.07E-13	8,85E-12	1,53E-11
Sb(c)	1E-30	1J5E-27	0.019205	0,322163	1,94603	1,9621	1,9441	1,84247	1,8031
Sb	1,93E-22	1,93 E-22	5,22E-21	4.2E-16	L3E-12	5,08E-10	4.99E-08	1.49E-06	2,69E-06
Sb <sub>2</sub>	1,93E-22	1,93E-22	3,97E-16	7,78E-12	8,56E-09	1,51E-06	7,83 E-05	0,001106	0,00172
Sb <sub>3</sub>	1,93E-22	1,93 E-22	3,28E-20	7.33E-15	4,43E-11	2,73E-08	3,65E-06	8,65E-05	0,000146
Sb <sub>4</sub>	1,93E-22	6,2E-21	2.39E-13	2,05 E-09	1,22E-06	0,000133	0,004582	0,02927	0,038666
SbO	1,93E-22	1,93E-22	L93E-22	U94E-20	1.27E-16	1,01E-13	2.78E-П	2,38E-09	5.17E-09
Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (c)	9,9E-06	0,000216	2.86E-30	2.86E-30	1E-30	2,86E-30	2.86E-30	2,86E-30	2,86E-30
	1,93E-22	2,32 E-15	1.72E-14	8,87E-151	9,93 E-15	2,78E-14	1,08E-12	3.07E-11	5,47E-11
Sb <sub>4</sub> O <sub>6</sub>	1,93E-22	1,93E-22	1.02E-17	3,15E-13	4,74 E-10	1,08E-07	5,99E-06	0,00011	0,000181
SbH	U93E-22	1,93 E-22	7.46E-19	4,23E-15	1.43E-12	8,8E-11	1.14E-09	5,33E-09	6.88E-09
SbH <sub>2</sub>	1,93E-22	1,93 E-22	5.78E-16	K29E-11	1.57E-08	9,33 E-07	3,21 E-05	0,000503	0,000809
SbS	0,98131	0,9811	0.971713	0,820235	0.008301	2,86E-30	2.86E-30	2,86E-30	2,86E-30
Sb <sub>2</sub> S <sub>3</sub> (c)	4.07471	1,16242	2,86E-30	2.86E-30	1E-30	2,86E-30	2.86E-30	2,86E-30	2,86E-30
C(c)	6.62E-11	1E-06	0,000251	0,008923	0.115013	0,62161	1,31096	1,82383	1.91838
CO	4,0702	5,52866	6.15137	€44787	7,44992	7,81531	7,51618	7,01948	6,92334
CO <sub>2</sub>	1,93E-22	1,93 E-22	4.8E-19	2,35E-15	6,5 E-13	2,41 E-11	7,5I 11	9,23 E-11	9,36E-11
CH <sub>4</sub>	0,73878	2,19261	2,73206	2,42653	1,31142	0,429898	0,028536	0,001446	0,000838
CH <sub>2</sub>	U93E-22	1,93 E-22	1,93E-22	1.77E-18	2,67E-15	2,62E-13	7.89E-13	6,24 E-13	5,81E-13
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	5,8 IE-13-	3,38E-16	1,2E-12	1.75E-10	3.17E-09	9,91 E-09	U37E-09	7.8E-11	4,56E-i 1
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	1,52E-09	1,62 E-07	1.18E-06	2,74E-06	2.07E-06	5,25E-07	6,92E-09	5.13E-11	2,08E-11
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	2,09 E-16	2,6E-13	5,9E-12	2,37E-11	1.89E-11	3,03 E-12	6,79E-15	6,57E-18	1.84E-18
Mb	1,93E-22	1,93 E-22	1,93 E-22	3,03 E-19	6,1E-16	1,33E-13	3,99E-12	4,25E-11	6,39E-11
CHO	1,93E-22	1,93 E-22	5.4E-22	2,77E-18	1,179	9,28E-14	2,08E-12	2,2E-11	3,32E-11
CH <sub>2</sub> O	L93E-22	3,22E-16	K2H-12	2,32E-10	H76E-09	7,39E-08	1,61 E-07	1.94E-07	1,99 E-07
CH <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	2,5 IE-13	1,73E-10	6,77E-09	6,94E-08	3,21E-07	8,28E-07	1,07E-06	L08E-06	L08E-06
CH <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	2,27E-14	4,54E-1Й	6,09E-11	2.5E-10	4Д6E-10	3.16E-10	3.78E-11	3,04E-12	1,91E-12
C <sub>3</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub>	1,93E-22	9,02 E-19	3,7 IE-16	1,1 IE-14	5,04E-14	3,93E-14	7,25E-16	5,54E-18	2,25 E-18
c <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O	L93E-22	1,93 E-22	1,93 E-22	U5E-19	1,6 IE-15	4.14E-13	1,63E-11	2,25 E-10	3,53E-10
CS	1,93E-22	1,07E-18	2.2H-13	1.29E-09	5,46E-07	3,18E-06	1,02 E-05	2,29E-05	2.64E-05
CS <sub>2</sub>	9,12E-12	1,37E-08	5.34 E-t'O	0,000364	0,007333	0,016868	0,028003	0,038908	0,041107
COS									

Таблица 3

Распределение сурьмосодержащих частиц в газовой фазе (моль/кг) в зависимости от температуры

т	Sb(c)	Sb	Sfc	Sbj	Sb <sub>4</sub>	SbO	SbjOjfc)	SbjOs	SbH	SbH]	SbS	Sb <sub>2</sub> S <sub>3</sub> (c)
285	1e-30	1,93e-22	1,93e-22	1,93e-22	1,93e-22	1,93e-22	9,1e-06	1,93e-22	1,93e-22	1,93e-22	1,93e-22	0,98131
385	1,15e-27	1,93e-22	1,93e-22	1,93e-22	6.2e-21	1,93e-22	0,000216	2,32e-15	1,93e-22	1,93e-22	1,93e-22	0,9811
485	0,019205	5,22e-21	3,97e-16	3,28e-20	2,39e-13	1,93e-22	2,86e-30	1,72e-14	1.02e-17	7,46e-19	5,78e-16	0,971713
585	0,322163	4,2e-16	7,78e-12	7,33e-15	2,05e-09	1,94e-20	2,86e-30	8,87e-15	3,15e-13	4,23e-15	1,29e-11	0,820235
685	1,94603	1,3e-12	8,56e-09	4,43e-11	1,22e-06	1,27e-16	1e-30	9,93e-15	4,74e-10	1,43e-12	1,57e-08	0,008301
785	1,9621	5,08e-10	1,51e-06	2,73e-08	0,000133	1,01e-13	2,86e-30	2,78e-14	1,08e-07	8,8e-11	9,33e-07	2,86e-30
885	1,9441	4,99e-08	7,83e-05	3,65e-06	0,004582	2,78e-11	2,86e-30	1,08e-12	5,99e-06	1,14e-09	3,21e-05	2,86e-30
985	1,84247	1,49e-06	0,001106	8,65e-05	0,02927	2,38e-09	2,86e-30	3,07e-11	0,00011	5,33e-09	0,000503	2,86e-30
1005	1,8031	2,69e-06	0,00172	0,000146	0,038666	5,17e-09	2,86e-30	5,47e-11	0,000181	6,88e-09	0,000809	2,86e-30

рис.1 представлены только основные компоненты газовой фазы (H<sub>2</sub>,H<sub>2</sub>O,H<sub>2</sub>S,Sb(c),C(c), CO,CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, COS) в равновесных условиях. Распределение сурьмосодержащих частиц в газовой фазе (моль/кг) в зависимости от температуры приведено в табл.3. Отсюда хорошо видно, что конденсированная сурьма Sb(c) имеет место в пределах от 0,019205 до 1,8031 моль/кг при температурах 485 - 1005 К. Образование активных частиц в гетерогенных системах объясняется протеканием сложных сопряженных реакций, что и подтверждается значениями термодинамических параметров при КО, U<0, а также изменением энергетических, тепловых и вязкостных свойств компонентов системы: V, S, I, U, C'p, Mu, Lt', Pr' (табл. 1).

Таким образом, полученные результаты в дальнейшем могут быть использованы при разработке технологии выщелачивания сурьмосодержащих компонентов из некондиционных руд и вторичного сырья, а

также при подборе эффективного выщелачивающего агента для процессов конверсии благородных и редких металлов из упорных руд.

**Условные обозначения:**  $C$  - рабочая концентрация, кг/м<sup>3</sup>;  $C^*$  - равновесная концентрация, кг/м<sup>3</sup>;  $C^0$  - начальная концентрация, кг/м<sup>3</sup>;  $C_p'$  - удельная теплоемкость (равновесная), кДж/(кг·К);  $I$  - полная энтальпия, кДж/кг;  $M_i$  - коэффициент динамической вязкости, Па·с;  $Pr'$  - число Прандтля (равновесное);  $S$  - энтропия, кДж/(кг·К);  $T$  - температура, К;  $U$  - полная внутренняя энергия, кДж/кг;  $V$  - удельный объем, м<sup>3</sup>/кг;

**Литература:**

1. Муратова В.А. Физико-химические свойства арсенопирита и арсенидов железа: Автореф. дис.на соискание уч. степени канд.хим. наук. М., 1989. 25 с.
2. Термодинамические константы веществ /Под. Ред. В.П. Глушко, ВИНТИ АН СССР, 1966. Вып.2.95с.
3. Соложенкин П.М. Способы переработки сурьмяно-мышьяковых руд и концентратов - «Цветные металлы»- 1997, № 7,с.27-33.
4. Акильбекова Ш.К. Исследование и разработка технологии сульфидовозгоночного обжига золото-сурьмяных руд и концентратов - Автореф. дис. на соискание уч.степени канд. техн. наук-Алматы, 2010.
5. Штойк С.Г. Исследование окислительно-восстановительных процессов при автогенной плавке свинцового сульфидного сырья и разработка аппаратурно-технологической схемы, обеспечивающей наибольшую эффективность его переработки-Автореф. дис. на соискание уч. степени канд. техн. наук- Москва ,2011
6. Сиярев Г.Б., Ватолин Н.А., Трусов Б.Г., Моисеев Г.К. Применение ЭВМ для термодинамических расчетов металлургических процессов. - Москва: Наука, 1982.

**Рецензент: к.хим.н. Шарипова Г.К.**