

МАСС-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ Y_2O_3 С УГЛЕРОДОМ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

© 2024 г. Ю. И. Фоломейкин^a, В. Л. Столярова^{b, c, *}, С. И. Лопатин^{b, c}

^aГосударственный научный центр, федеральное автономное учреждение

“Центральный институт авиационного моторостроения имени П. И. Баранова”, 111116, Москва, Россия

^bФедеральное государственное бюджетное учреждение науки Ордена Трудового Красного Знамени

Институт химии силикатов им. И. В. Гребенщикова РАН, 199034, Санкт-Петербург, Россия,

^cСанкт-Петербургский государственный университет, 199034, Санкт-Петербург Россия,

*e-mail: v.stolyarova@spbu.ru

Поступила в редакцию 20.11.2023 г.

После доработки 20.11.2023 г.

Принята к публикации 05.12.2023 г.

Методом высокотемпературной дифференциальной масс-спектрометрии изучено испарение Y_2O_3 в присутствии углерода. Впервые установлено, что в температурном интервале 1950–2200 К в паре над системой Y_2O_3 –С присутствуют YO и атомарный иттрий. Показано, что с увеличением температуры парциальное давление пара YO над системой Y_2O_3 –С уменьшается по сравнению с парциальным давлением пара YO над индивидуальным Y_2O_3 , что как следствие приводит к понижению активности оксида иттрия в рассматриваемой системе.

Ключевые слова: высокотемпературная масс-спектрометрия, испарение, система Y_2O_3 –С

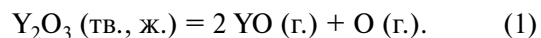
DOI: 10.31857/S0044453724090117, **EDN:** ONQRXE

Керамические изделия из индивидуальных высокоогнеупорных оксидов находят широкое применение в различных современных высокотемпературных технологических процессах и особенно при температурах более 2100 К в контакте с различными материалами в разнообразных газовых средах, например, с керамикой, огнеупорами, металлами, металлическими и оксидными расплавами.

Современная технология литья по выплавляемым моделям деталей специального назначения с направленной структурой, включая лопатки авиационных газотурбинных двигателей, предполагает использование электрических вакуумных печей с графитовыми нагревателями [1]. Применение композиционных сплавов нового поколения на основе тугоплавких металлов как альтернатива никелевым жаропрочным сплавам связано с необходимостью проведения процесса направленной кристаллизации при температурах, превышающих 2000 К [2]. Однако в промышленных печах проведение направленной кристаллизации проводится, как правило, в восстановительной углеродсодержащей атмосфере, наличие которой может приводить к необратимым фазовым и структурным изменениям литейной керамической формы, нарушая технологические характеристики процесса. В настоящее время оксид алюминия широко применяется в качестве основного компонента керамических

форм при направленной кристаллизации никелевых жаропрочных сплавов. В результате изучения испарения Al_2O_3 в присутствии углерода при высоких температурах показано, что восстановление оксида алюминия инициируется при температуре выше 1800 К, и происходит как при непосредственном контакте Al_2O_3 с углеродом, так и с участием компонентов газовой фазы [3–9]. Следует отметить, что литье композиционных сплавов на основе тугоплавких металлов требует применения более термически устойчивых керамических материалов по сравнению с Al_2O_3 . Как показано ранее [10, 11], в этом случае альтернативой керамике из оксида алюминия могут являться керамические формы, изготовленные из Y_2O_3 . Однако информация о высокотемпературном поведении оксида иттрия в восстановительных условиях весьма ограничена [9, 12].

Рассмотрим имеющиеся данные об испарении оксида иттрия, которое к настоящему времени изучалось неоднократно [13–22]. Установлено, что оксид иттрия Y_2O_3 при высоких температурах переходит в пар согласно уравнению:



В таблице 1 обобщены данные, имеющиеся в литературе [13–19], о парциальных давлениях YO

Таблица 1. Коэффициенты A и B в уравнении температурной зависимости парциального давления пара (Па) YO над Y_2O_3 , $\lg p(YO) = -A/T + B$ и величина парциального давления YO над Y_2O_3 при температуре 2200 К согласно [13–15, 17–19] и данным, полученным в настоящей работе

T, K	Материал эффузионной камеры	A	B	$p(YO),$ (2200 K)	Литература
2492–2697	W	31295±2032	12.0±0.8	6.0×10^{-3}	[13]
2509–2720	W	32376±1412	12.2±0.5	3.0×10^{-3}	[14]
2220–2650	W	34570±160	13.1±0.1	2.4×10^{-3}	[15]
2691–2940	W	34676±1295	12.3±0.5	3.4×10^{-4}	[17]
2300–2550	-	34467	13.1	2.7×10^{-3}	[18]
2257–2703	W	35387±388	13.5±0.2	2.6×10^{-3}	[19]
1946–2175	Mo	43724±1388	17.2±0.7	2.2×10^{-3}	Настоящее исследование

над Y_2O_3 согласно уравнению (1) до температуры 2940 К.

Необходимо подчеркнуть, что в паре над Y_2O_3 помимо монооксида иттрия был идентифицирован также атомарный иттрий, причем соотношение парциальных давлений $p(YO)$: $p(Y) = 60$ при температуре 2500 К, как показано в работе [20]. При исследовании испарения смеси $Y_2O_3 + Y$ из вольфрамовых камер [12] в интервале температур 1833–2100 К были найдены следующие зависимости парциальных давлений (Па) YO и атомарного иттрия от температуры:

$$\lg p(YO) = -(26460)/T + 11.28, \quad (2)$$

$$\lg p(Y) = -(17650)/T + 9.09. \quad (3)$$

Следует подчеркнуть, что соотношение парциальных давлений $p(YO)$: $p(Y)$ при температуре 1833 К равно 411, а при температуре 2100 К уменьшается до величины 101, что, по-видимому, связано с избирательным испарением металлического иттрия из смеси.

Значений парциальных давлений молекулярных форм пара в системе Y_2O_3-C при высоких температурах в литературе не найдено.

Таким образом, целью настоящего исследования является изучение процессов испарения Y_2O_3 при высоких температурах в присутствии углерода для выявления процессов, протекающих в системе Y_2O_3-C , а также оценки температуры, при которой возможна надежная эксплуатация керамических форм из оксида иттрия в восстановительных условиях.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Работа выполнена масс-спектрометрическим эффузионным методом Кнудсена на масс-спектрометре МС-1301, предназначенном для изучения

процессов испарения и термодинамических свойств труднолетучих веществ. Испарение образцов оксида иттрия и оксида иттрия с углеродом выполнено из сдвоенной однотемпературной молибденовой камеры, нагреваемой электронной бомбардировкой. Температура измерялась оптическим пирометром ЭОП-66 с точностью ± 10 К в интервале температур 1500–2600 К. Для определения природы ионов масс-спектрах пара над исследуемыми образцами измерялись энергии появления ионов в масс-спектрах пара методом исчезновения ионного тока. В качестве стандарта для определения энергий появления исследуемых ионов было выбрано золото с известной энергией ионизации, равной 9.2 эВ [23].

Испарение образцов проводили следующим образом. В одну из ячеек сдвоенной эффузионной камеры загружалась смесь оксида иттрия с активированным углем марки БАУ-А ГОСТ 6217–74, в другую, сравнительную, индивидуальный оксид иттрия марки “о.с.ч.” с содержанием Y_2O_3 не менее 99.9995 мас. %. Образец, содержащий Y_2O_3 и С, был приготовлен перетиранием в агатовой ступке смеси указанных компонентов, взятых в соотношении 1:1. Парциальные давления молекулярных форм пара над Y_2O_3 и смесью Y_2O_3-C были определены методом сравнения ионных токов с использованием золота в качестве стандарта парциального давления пара [24] согласно уравнению:

$$p_1 = \frac{p_2 I_1 T_1 \sigma_2 \gamma_2}{I_2 T_2 \sigma_1 \gamma_1}, \quad (4)$$

где I_i – суммарная величина ионного тока, возникающего при ионизации молекулярной формы пара i , T_i – температура (К), σ_i – сечение ионизации молекулярной формы пара i , γ_i – коэффициент конверсии вторичного электронного множителя, равный квадратному корню из молекулярной массы соответствующей молекулярной формы пара i , p_i – парциальное давление молекулярной формы

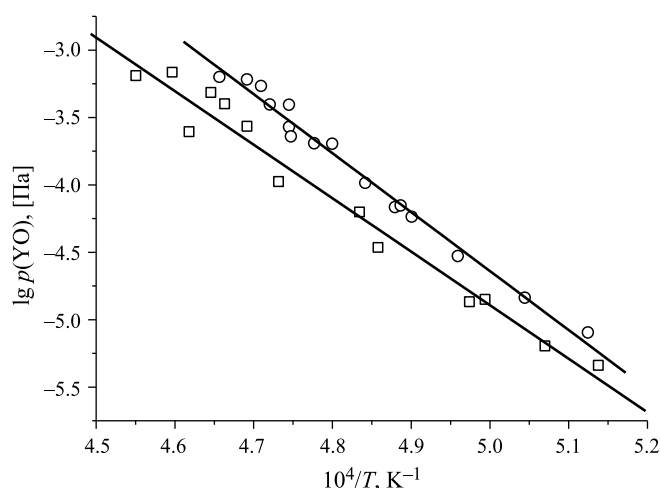


Рис. 1. Зависимости логарифма парциального давления YO от величины обратной температуры в паре над образцами системы Y_2O_3-C (1) и индивидуального Y_2O_3 (2), определенные в настоящей работе.

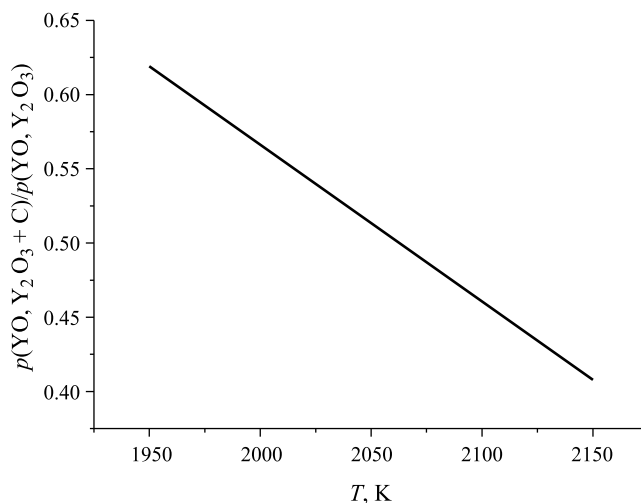


Рис. 2. Зависимость отношения парциальных давлений YO в паре над образцами системы Y_2O_3-C и индивидуальным оксидом иттрия от температуры, полученная в настоящей работе.

пара i ; индексы “1” и “2” относятся к образцу и стандарту соответственно.

Аппаратура предварительно калибровалась по давлению пара CaF_2 , принятого согласно рекомендациям [25]. Более подробно использованная аппаратура и методика идентификации состава газовой фазы и определения парциальных давлений молекулярных форм пара опубликована и рассмотрена неоднократно ранее, в частности, в работах [26–28].

В масс-спектрах пара над образцами индивидуального Y_2O_3 и системы Y_2O_3-C , начиная с температуры 1950 К были идентифицированы ионы Y^+ и YO^+ , соотношения интенсивностей которых в обоих случаях не превышало величину, равную 0.01–0.02. Для определения молекулярных предшественников ионов Y^+ и YO^+ были измерены энергии появления указанных ионов в масс-спектрах пара над индивидуальным Y_2O_3 и системой Y_2O_3-C методом исчезающего ионного тока. Найденные величины были равны 11.5 эВ и 6.0 эВ соответственно. Показано, что определенная энергия появления иона YO^+ в масс-спектрах исследуемого пара в пределах погрешности измерений совпадала с энергией ионизации газообразной молекулы YO, а энергия появления иона Y^+ была значительно выше энергии ионизации атомарного иттрия [29].

Таким образом, из анализа масс-спектров пара над образцами индивидуального оксида иттрия и системы Y_2O_3-C , зависимостей интенсивностей ионных токов Y^+ и YO^+ от температуры, а также величин энергий появления ионов Y^+ и YO^+ можно заключить, что в паре над образцами индивидуального оксида иттрия и системы Y_2O_3-C присутствуют

YO и атомарный кислород. Однако величины ионного тока O^+ в данной работе не измерялись, принимая во внимание значительный фон остаточных газов в вакуумной части масс-спектрометра.

Измерение зависимостей интенсивностей ионных токов YO^+ в масс-спектрах пара над образцами индивидуального Y_2O_3 и системы Y_2O_3-C , а также определение парциальных давлений YO над указанными образцами методом сравнения ионных токов позволили получить в температурном интервале 1946–2175 К зависимости парциального давления монооксида иттрия над Y_2O_3 и образцом системы Y_2O_3-C от температуры, рис. 1:

$$Y_2O_3 : \lg p, (\text{Па}) = -\frac{43724 \pm 1388}{T} + (17.22 \pm 0.67), \quad (5)$$

$$Y_2O_3 - C : \lg p(\text{Па}) = -\frac{39738 \pm 1256}{T} + (14.97 \pm 0.96). \quad (6)$$

На рис. 2. приведена зависимость отношения парциальных давлений YO в паре над образцами системы Y_2O_3-C и индивидуальным оксидом иттрия от температуры, полученная в настоящей работе. Необходимо отметить, что при повышении температуры величина указанного выше соотношения парциальных давлений пара YO понижается.

По-видимому, понижение парциального давления пара YO над образцом системы Y_2O_3-C по сравнению с индивидуальным оксидом иттрия связано с образованием термически прочных соединений при повышении температуры в конденсированной фазе, например карбидов или оксикарбидов

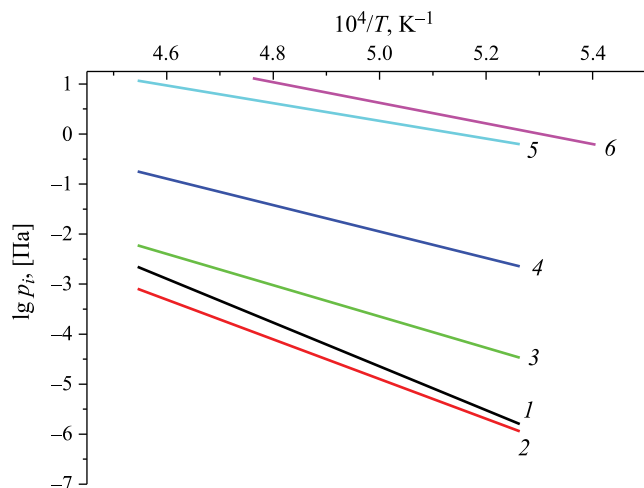


Рис. 3. Зависимости парциальных давлений пара YO от температуры над образцами системы Y_2O_3-C (1) и индивидуальным Y_2O_3 (2), полученные в настоящей работе, а также приведенные в литературе для следующих молекулярных форм пара: (3) – YO над Y_2O_3 [13], (4) и (5) – YO и Y над образцом системы Y_2O_3-Y [12], Y над металлическим иттрием [25].

иттрия. Однако в этой связи целесообразно отметить, что при температуре 2150 К в масс-спектре пара над системой Y_2O_3-C не были идентифицированы ионы YC^+ и YC_2^+ , характерные для испарения карбида иттрия [30]. Отсутствие указанных ионов в масс-спектре пара над системой Y_2O_3-C , возможно, было связано с незначительной величиной парциального давления пара YC_2 за пределами чувствительности масс-спектрометра.

На рис. 3 полученные в настоящей работе данные сопоставлены с результатами определения температурных зависимостей парциальных давлений пара YO над индивидуальным Y_2O_3 и системой Y_2O_3-Y , а также атомарного иттрия в паре над образцами металлического иттрия и системы Y_2O_3-Y , опубликованными в работах [12–19].

Как следует из сопоставления результатов, приведенных в таблице 1 и на рис. 1, полученные в настоящей работе парциальные давления пара YO над индивидуальным оксидом иттрия, и определенные в работах [13–19], близки по значениям.

Необходимо отметить, что взаимодействие металлического иттрия с Y_2O_3 [12] приводит к увеличению парциального давления пара YO как следствие частичного восстановления оксида иттрия и понижению парциального давления атомарного иттрия по сравнению с давлением пара Y над металлическим иттрием.

В температурном интервале 1946–2175 К для образца системы Y_2O_3-C , содержащего 50 мол. % C, определена величина активности Y_2O_3 (a_i) из соотношения:

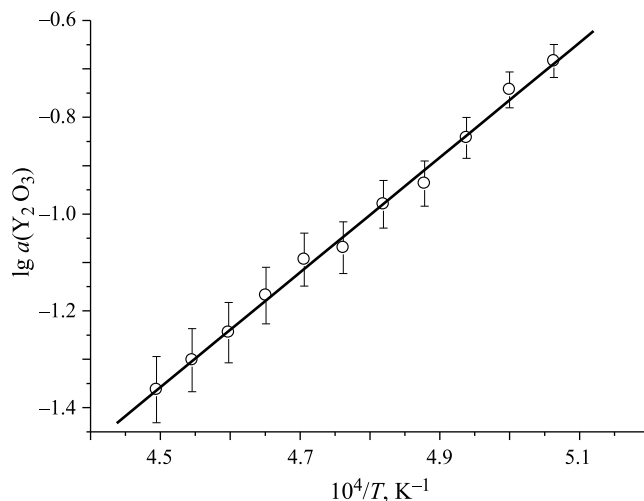


Рис. 4. Зависимость логарифма активности Y_2O_3 от обратной температуры для образца системы Y_2O_3-C , содержащего 50 мол. % C, в температурном интервале 1946–2175 К, полученная в настоящей работе.

$$a(Y_2O_3) = \frac{p(Y_2O_3)}{p_0(Y_2O_3)} = \frac{p^2(YO)p(O)}{p_0^2(YO)p_0(O)}, \quad (7)$$

где значения p_i и p_0 относятся соответственно к парциальным давлениям молекулярных форм пара над исследуемой системой Y_2O_3-C и индивидуальным оксидом иттрия.

Полученная зависимость активности Y_2O_3 от температуры для образца системы Y_2O_3-C , содержащего 50 мол. % C, в температурном интервале 1946–2175 К свидетельствует о понижении активности Y_2O_3 при повышении температуры согласно найденному уравнению, рис. 4:

$$\lg a(Y_2O_3) = -\frac{11054 \pm 496}{T} + (6.32 \pm 0.24). \quad (8)$$

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Впервые полученные в настоящей работе данные о термодинамическом описании системы Y_2O_3-C в температурном интервале 1950–2200 К являются уникальной термодинамической информацией, отражающей одно из самых перспективных направлений современной высокотемпературной химии, связанного с изучением процессов, протекающих при взаимодействии оксидных и карбидных систем, а также материалов на их основе. В настоящее время число экспериментальных исследований в этом направлении весьма ограничено, несмотря на их актуальность для

решения широкого спектра технологических задач и проведения моделирования фазовых равновесий с привлечением современных баз термодинамических данных на основе подхода CALPHAD.

Наиболее яркой иллюстрацией значения исследований, выполненных в данном направлении, могут служить результаты работы [31], в которой были впервые проведено высокотемпературное экспериментальное изучение процессов взаимодействия химически прототипных металлической и оксидной составляющих расплава кориума реакторов ВВЭР с карбидной керамикой Zr_2AlC , а также с композиционной керамикой на основе диоксида циркония и Zr_2AlC , Zr_3AlC_2 , Ti_3SiC_2 , Ti_2SiC , Ti_3AlC_2 , Ti_2AlC . Была впервые установлена высокая химическая устойчивость до температуры 2773 К как карбидного, так и композиционного материала, содержащего Zr_2AlC . По итогам этой работы [31] материалы на основе системы ZrO_2 – Zr_2AlC были впервые рекомендованы для дальнейшего изучения в качестве покрытий и самостоятельных элементов активной зоны, как имеющие исключительную устойчивость в расплаве активной зоны ядерных реакторов.

Одной из первых работ, выполненных при изучении высокотемпературного взаимодействия оксидных и карбидных систем с участием газовой фазы, является исследование Шатильона с сотрудниками [9] при рассмотрении систем SiC – Al_2O_3 и SiC – Al_2O_3 – Y_2O_3 . Следует отметить, что результаты настоящего исследования качественно отличаются от данных, приведенных авторами [9] при сопоставлении парциального давления YO над индивидуальным Y_2O_3 и образцом системы SiC – Y_2O_3 . К сожалению, в работе [9] зависимости парциального давления YO от температуры над изученными системами приведены только в графической форме, что затрудняет интерпретацию полученных данных. Обсуждая итоги настоящего исследования необходимо подчеркнуть, что оксид иттрия в системе SiC – Y_2O_3 может восстанавливаться не только углеродом, но и кремнием, повышая парциальное давление YO по сравнению с давлением монооксида иттрия над индивидуальным Y_2O_3 . Неоднократно показано, что в присутствии восстановителей, и углерода, в частности, термическая устойчивость ряда оксидов уменьшается. Об этом свидетельствуют, например, результаты определения парциальных давлений пара SiO над SiO_2 [32–35], а также Al и Al_2O над Al_2O_3 [3–8], полученные методом высокотемпературной масс-спектрометрии и иллюстрирующие повышение парциальных давлений указанных молекулярных форм пара в присутствии углерода. Аналогичное повышение парциального давления пара YO наблюдалось при взаимодействии Y_2O_3 с металлическим иттрием [12]. При изучении высокотемпературного взаимодействия оксида алюминия с углеродом были

отмечены кинетические факторы, затрудняющие первоначальную стадию перехода в пар оксидов алюминия, углерода и атомарного алюминия [4, 5].

По-видимому, одна из причин отличия полученных нами данных в наблюдаемой тенденции изменения активности оксида иттрия с температурой в системе Y_2O_3 – C от результатов работы [9] может быть связана с различием состава конденсированной фазы, образующейся при взаимодействии оксида иттрия с углеродом по сравнению с системой SiC – Y_2O_3 . Следует отметить, что в настоящей работе из-за методических ограничений используемого подхода в рамках выполненного высокотемпературного масс-спектрометрического эксперимента не удавалось контролировать изменение состава конденсированной фазы при повышении температуры в процессе испарения системы Y_2O_3 – C . Однако было сделано допущение, что понижение парциального давления YO над образцом системы Y_2O_3 – C при повышении температуры является следствием образования карбидов иттрия и их сосуществованием с Y_2O_3 в конденсированной фазе. Корректность такого допущения можно проиллюстрировать на примере образования карбида урана, которое наблюдалось ранее при взаимодействии UO_2 с углеродом [36–38].

Таким образом, в результате проведенного исследования впервые идентифицирован состав пара над системой Y_2O_3 – C , определены парциальные давления YO и активности Y_2O_3 в температурном интервале 1950–2200 К. Найденные значения термодинамических свойств системы Y_2O_3 – C при высоких температурах могут быть рекомендованы для включения в базы данных для расчета фазовых диаграмм многокомпонентных систем с использованием подхода CALPHAD.

Работа выполнена при поддержке федерального бюджета по теме государственного задания Института химии силикатов имени И. В. Гребенщикова Российской академии наук № 0008-2022-0009, № госрегистрации 1023032900322-9-1.4.3.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Dexin M.A.* // *Front. Mech. Eng.* 2018. V. 13. № 1. P. 3. doi: 10.1007/s11465-018-0475-0
2. *Li Z., Yuan S.-N., Jia L.-N., et al.* // *Rare Metals*. 2017. V. 36. № 6. P. 472. doi: 10.1007/s12598-015-0649-4
3. *Sitnikov P.A., Lopatin S.I., Ryabkov Y.I., Grass V.E.* // *Rus. J. Gen. Chem.* 2004. V. 74. № 7. P. 989. doi: 10.1023/B: RUGC.0000045852.62299.10
4. *Folomeikin Y.I., Demonis I.M., Kablov E.N., et al.* // *Dokl. Chem.* 2004. V. 399. № 4–6. P. 257. doi: 10.1007/s10631-005-0007-4
5. *Folomeikin Y.I., Demonis I.M., Kablov E.N., et al.* // *Glass Phys. Chem.* 2006. V. 32. № 2. P. 191. doi: 10.1134/S1087659606020118

6. Heyrman M., Chatillon C. // J. Electrochem. Soc. 2006. V. 153. № 7. P. E119.
doi: 10.1149/1.2432077
7. Heyrman M., Berthomé G., Pisch A., Chatillon C. // J. Electrochem. Soc. 2006. V. 153. № 10. P. J107.
doi: 0.1149/1.2229285
8. Heyrman M., Pisch A., Chatillon C. //Ibid. 2007. V. 154. 3. P. 40.
doi: 10.1149/1.2431319
9. Baud S., Thévenot F., Pisch A., Chatillon C. // J. Europ. Ceram. Soc. 2003. V. 23. № 1. P. 1.
doi: 10.1016/S0955-2219(02)00067-5
10. Ma L.M., Yuan S.N., Cui R.J., et al. // Int. J. Refract. Met. Hard Mater. 2012. V. 30. № 1. P. 96.
doi: 10.1016/j.ijrmhm.2011.07.009
11. Wan B., Zhang H., Ran C., et al. // Ceram. Internat. 2018. V. 44. № 1. P. 32.
doi: 10.1016/j.ceramint.2017.07.163
12. Ackermann R.J., Rauch E.G. // J. Chem. Thermodyn. 1973. V. 5. № 3. P. 331.
doi: 10.1016/S0021-9614(73)80021-7
13. Ames H.W., Walsh P.M., White D. // J. Phys. Chem. 1967. V. 71. № 8. P. 2707.
doi: 10.1021/j100867a049
14. Ackermann R.J., Rauch E.G., Thorn R.J. //J. Chem. Phys. 1964. V. 40. № 3. P. 883.
doi: 10.1063/1.1725221
15. Marushkin K.N., Alikhanyan A.S., Orlovskij V.P. // Russ. J. Inorg. Chem. 1990. V. 35. № 8. P. 2071.
16. Sevastyanov V.G., Simonenko E.P., Simonenko N.P. et al. // Mater. Chem. Phys. 2015. V. 153. № 3. P. 78.
doi: 10.1016/j.matchemphys.2014.12.037
17. Kablov E.N., Folomeikin Y.I., Stolyarova V.L., Lopatin S.I. // Dokl. Phys. Chem. 2015. V. 463. № 1. P. 150.
doi: 10.1134/S0012501615070039
18. Kablov E.N., Stolyarova V.L., Vorozhtcov V.A., et al. // Rapid Commun. Mass Spectrom. 2018. V. 32. № 9. P. 686. doi: 10.1002/rcm.8081
19. Kablov E.N., Stolyarova V.L., Vorozhtcov V.A., et al. // J. Alloys Compd. 2019. V. 794. № 7. P. 606.
doi: 10.1016/j.jallcom.2019.04.208
20. White D., Walsh P.M., Ames H.W., Goldstein H.W. Thermodynamics of the Earth Oxides at Elevated Temperatures; Dissociation Energies of the Gaseous Monoxides. In: Thermodynamics of nuclear materials. Vienna, 1962. P. 417.
21. Trevisan G., Depaus R. // Z. Naturforsch. 1973. V. A. 28. № 1. P. 37.
22. Liu Ming B., Wahlberk P.G. // High Temp. Sci. 1974. V.6. № 6. P. 179.
23. Handbook on the Dissociation Energies of Chemical Bonds: Ionization Potentials and Electron Affinities, ed. V.N. Kondrat'ev, Moscow: Nauka, 1974.
24. Paule R.C., Mandel J. // Pure Appl. Chem. 1972. V. 31. № 3. P. 371.
25. Gurvich L.V., Veitz I.V., Medvedev V.A., et al. Thermodynamic Properties of Individual Substances, V.4 (2), Moscow: Nauka, 1982.
26. Stolyarova V.L., Semenov G.A. Mass Spectrometric Study of the Vaporization of Oxide Systems. Chichester: Wiley & Sons. 1994. 434 p.
27. Lopatin S.I., Shugurov S.M., Fedorova A.V., et al. // J. Alloys Compd. 2017. V. 693. P. 1028.
doi: 10.1016/j.jallcom.2016.09.211
28. Vorozhtcov V.A., Stolyarova V.L., Lopatin S.I., et al. // Rapid Commun. Mass Spectrom. 2017. V. 31. № 1. P. 111.
doi: 10.1002/rcm.7764
29. Lias S.G., Bartmess J.E., Liebman J.F., et al. // J. Phys. Chem. Ref. Data. 1988. V. 17 (Suppl. 1). P. 1.
30. De Maria G, Guido M., Malaspina L., Pesce B. // J. Chem. Phys. 1965. V. 43. № 12. P. 4449.
doi: 10.1063/1.1696715
31. Альяшев В.И., Столярова В.Л., Крушинов Е.В., и др. // Технологии обеспечения жизненного цикла ЯЭУ. 2023. № 1 (31). С. 60.
doi: 10.52069/2414-5726_2023_1_31_60
32. Honstein G., Chatillon C. //J. Alloys Compd. 2008. V. 452. № 1. P. 85.
doi: 10.1016/j.jallcom.2007.01.174
33. Honstein G., Chatillon C., Baillet F. // J. Europ. Ceram. Soc.2012. V. 32. № 5. P. 1117.
doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2011.11.032
34. Honstein G., Chatillon C., Baillet F. // J. Chem. Thermodyn. 2013. V. 59. № 1. P. 144.
doi: 10.1016/j.jct.2012.10.001
35. Sokolov M.T., Lopatin S.I., Pechkovskii V.V., Shepeleva V.V. // Deposited in VINITI. 24.10.1989. № 6429-B89.
36. Gossé S., Guéneau C., Chatillon C., Chatain C. //J. Nucl. Mater. 2006. V. 352. № 1–3. P. 13.
doi: 10.1016/j.jnucmat.2006.02.079
37. Gossé S., Guéneau C., Alpettaz T., et al. //J. Engineer. Gas Turbines and Power. 2010. V. 132. № 1.P. N012903.
doi: 10.1115/HTR2008-58148
38. Gossé S., Guéneau C., Alpettaz T., et al. /Nucl. Engineer. Design. 2008. V. 238. № 11. P. 2866.
doi: 10.1016/j.nucengdes.2008.01.019