

ПОВЕРХНОСТНЫЕ КОМПЛЕКСЫ НА ГРАНИЦЕ ГИДРАТИРОВАННЫЕ ДИОКСИДЫ/ВОДНЫЕ РАСТВОРЫ С РАЗЛИЧНЫМ ЗНАЧЕНИЕМ pH

А.В. Кострикин¹, О.В. Косенкова², И.Г. Горичев⁴,
Ф.М. Спиридонов⁵, Л.Н. Комиссарова⁵, И.В. Линько⁶,
Д.В. Панкратов⁴, Л.П. Кострикина³, Р.В. Кузнецова², Б.Е. Зайцев⁷

Кафедра «Химия», ФГБОУ ВПО «Мичуринский государственный педагогический институт» (1); кафедры: «Химия» (2), «Математика и моделирование экономических систем» (3), ФГБОУ ВПО «Мичуринский государственный аграрный университет», г. Мичуринск; кафедра «Физическая химия», ФГБОУ ВПО «Московский педагогический государственный университет» (4); кафедра «Неорганическая химия», ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова» (5); кафедры: «Неорганическая химия» (6), «Общая химия» (7), ФГБОУ ВПО «Российский университет дружбы народов», г. Москва; AVKostrikin@rambler.ru

Представлена членом редколлегии профессором В.И. Коноваловым

Ключевые слова и фразы: гидратированный диоксид; потенциметрическое титрование; поверхностные комплексы; показатели максимумов концентраций поверхностных комплексов.

Аннотация: По результатам потенциметрического титрования суспензий гидратированных диоксидов подгрупп германия и титана в рамках существующих моделей найдена зависимость концентрации поверхностных комплексов на границе гидратированный диоксид/водный раствор электролита от величины pH раствора и температуры получения гидратированного диоксида.

Гелеобразные гидратированные диоксиды титана, олова и циркония находят применение в качестве сорбентов для извлечения металлов платиновой группы, золота, ртути и меди из водных растворов [1]. Гидратированный диоксид олова применяется в качестве катализатора в органическом синтезе [2]. Изучение свойств и строения гидратированных диоксидов элементов IV группы позволяет понять особенности проявления их сорбционной и каталитической активностей и разработать пути повышения эффективности их использования. В этой связи возникает вопрос о детальном описании кислотно-основных равновесий на границе диоксид металла (гидратированный диоксид)/водный раствор электролита. Подробное описание этого процесса позволило бы оптимизировать применение названной группы соединений в качестве эффективных катализаторов в кислотно-основном катализе и специфических сорбентов. Кроме того, эти процессы являются начальными стадиями растворения шихты в гидротермальных синтезах технически важных монокристаллических материалов. Гидратированные диоксиды, обладая более высокой химической активностью по сравнению с безводными со-

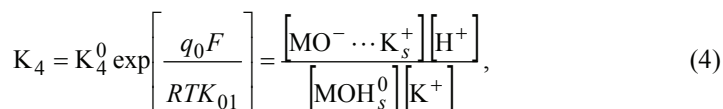
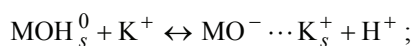
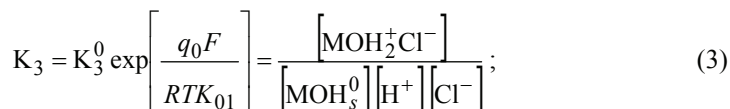
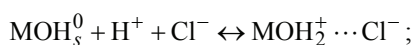
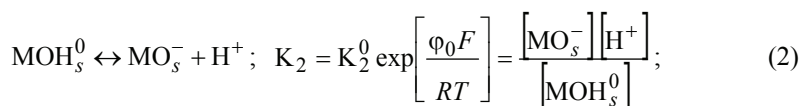
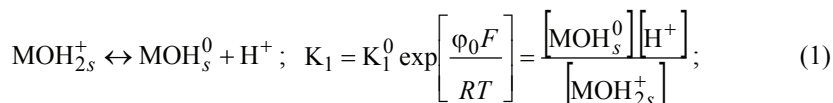
единениями, могут служить прекурсорами в производстве оксосоединений, используемых в компьютерной технике и приборах связи. Таким образом, исследование строения и кислотно-основных свойств гидратированных диоксидов элементов IV группы, форм и свойств соединений, образующихся при взаимодействии их со щелочными растворами, представляют не только теоретический, но и практический интерес и являются актуальной задачей современной неорганической химии.

В работах [3, 4] методом потенциометрического титрования суспензий гидратированных диоксидов погрупп германия и титана, основываясь на их строении, получены константы процессов равновесий на границе гидратированный диоксид/водный раствор электролита.

На основе полученных данных по потенциометрическому титрованию суспензий гидратированных диоксидов элементов подгрупп германия и титана необходимо найти изменение концентраций поверхностных комплексов на границе гидратированный диоксид/водный раствор электролита в зависимости от величины рН раствора и температуры получения гидратированного диоксида.

Для потенциометрического титрования, согласно [4], использованы аппаратура, растворы электролитов и гидратированные диоксиды $\text{TiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$, $\text{ZrO}_2 \cdot 2,5\text{H}_2\text{O}$, $\text{SnO}_2 \cdot 1,75\text{H}_2\text{O}$ и $\text{HfO}_2 \cdot 2,3\text{H}_2\text{O}$, выделенные при 50 °С, а также гидратированные диоксиды, полученные нагреванием указанных соединений при более высоких температурах. В случае германия и свинца использованы коммерческие диоксиды GeO_2 и PbO_2 квалификации «х. ч.».

Согласно модельным представлениям, развитым в работах [5–7], на границе гидратированный диоксид/водный раствор электролита устанавливаются следующие равновесия:



где φ_0 и q_0 – потенциал и заряд на границе гидратированный диоксид/водный раствор электролита; $F = 96485$ Кл/моль; $R = 8,31$ Дж/(моль·К); $T = 298$ К (температура в условиях опыта); K_{01} – емкость плотной части двойного электрического слоя на границе гидратированный диоксид/водный раствор электролита, Ф/м².

Методика потенциометрического титрования, модели, используемые для расчетов, и особенности их применения для нахождения констант равновесия подробно приведены в [4].

Значения констант $pK_{i,T}^0$ и pH точек нулевого заряда $pH_{ТНЗ}$, полученные таким образом для гидратированных диоксидов титана, циркония, олова и гафния, выделенных при различных температурах, сведены в табл. 1. В случае коммерческих образцов диоксидов германия и свинца были получены следующие результаты: $pK_1^0 = 7,0$; $pK_2^0 = 7,7$; $pK_3^0 = 7,7$; $pK_4^0 = 5,2$; $pH_{ТНЗ} = 7,0$ для GeO_2 и $pK_1^0 = 6,5$; $pK_2^0 = 7,8$; $pK_3^0 = 8,3$; $pK_4^0 = 6,4$; $pH_{ТНЗ} = 7,2$ для PbO_2 .

Таблица 1

Значения pK_1^0 , pK_2^0 , pK_3^0 , pK_4^0 и $pH_{ТНЗ}$ для гидратированных диоксидов титана, циркония, олова и гафния, выделенных при различных температурах

Исходный диоксид	pK_i^0	Температура, °С			
		50	120	200	700
$TiO_2 \cdot nH_2O$	pK_1^0	5,6	5,4	Нет данных	
	pK_2^0	9,8	8,9		
	pK_3^0	7,7	7,3		
	pK_4^0	7,5	6,8		
	$pH_{ТНЗ}$	7,8	7,1		
$ZrO_2 \cdot nH_2O$	pK_1^0	4,5	4,7	4,9	4,9
	pK_2^0	8,8	8,9	9,2	9,8
	pK_3^0	6,3	6,3	6,7	5,8
	pK_4^0	7,1	7,1	7,5	6,7
	$pH_{ТНЗ}$	6,5	6,6	7,0	6,8
$SnO_2 \cdot nH_2O$	pK_1^0	5,6	5,0	5,0	5,0
	pK_2^0	8,2	9,0	9,3	9,9
	pK_3^0	6,8	6,4	6,1	6,1
	pK_4^0	6,8	7,2	7,1	6,8
	$pH_{ТНЗ}$	6,9	6,8	7,0	6,9
$HfO_2 \cdot nH_2O$	pK_1^0	3,8	3,9	4,0	4,5
	pK_2^0	9,1	9,5	9,7	9,7
	pK_3^0	6,4	6,3	6,7	6,1
	pK_4^0	6,6	7,1	7,2	7,0
	$pH_{ТНЗ}$	6,5	6,7	6,8	6,9

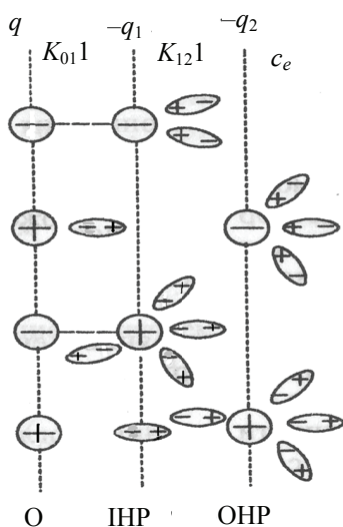


Рис. 1. Схема строения ДЭС (трех-слойная модель Грэма–Парсона): О – поверхность диоксида; c_e – раствор электролита, знаками: «+» и «-» отмечены заряды ионов и ориентация диполей воды

Величины зарядов могут быть выражены через концентрации поверхностных ионов гидратированного диоксида и раствора электролита:

$$Q = F([\text{MOH}_2^+ \cdots \text{An}_s^-] + [\text{MOH}_{2s}^+] - [\text{MOH}^- \cdots \text{Kt}_s^+] - [\text{MO}_s^-]); \quad (7)$$

$$q_1 = F([\text{MO}^- \cdots \text{Kt}_s^+] - [\text{MOH}_2^+ \cdots \text{An}_s^-]); \quad (8)$$

$$q_2 = F([\text{MO}_s^-] - [\text{MOH}_{2s}^+]). \quad (9)$$

Из условий электронейтральности, материального баланса компонентов уравнений (7) – (9) и значения констант равновесий находим зависимость концентрации комплексных частиц на поверхности диоксида от рН и концентрации раствора фонового электролита:

$$[\text{MOH}_{2s}^+] = N_s K_3 [\text{H}^+]^2 / B; \quad (10)$$

$$[\text{MOH}_2^+ \cdots \text{An}_s^-] = N_s K_1 [\text{H}^+]^2 c / B; \quad (11)$$

$$[\text{MOH}_s^0] = N_s K_3 K_1 [\text{H}^+] / B; \quad (12)$$

$$[\text{MO}_s^-] = N_s K_1 K_2 K_3 / B; \quad (13)$$

$$[\text{MO}^- \cdots \text{Kt}_s^+] = N_s K_1 K_2 K_4 c / B; \quad (14)$$

$$B = K_3 [\text{H}^+]^2 + c K_1 [\text{H}^+]^2 + K_1 K_3 [\text{H}^+] + K_1 K_2 K_3 + K_1 K_2 K_4 c. \quad (15)$$

Используя полученные из результатов потенциометрического титрования значения констант равновесия $K_{i,T}$, рассчитывали изменения концентраций поверхностных комплексов с увеличением рН раствора. Все решения уравнений выполнены в программе MathCad [8].

Найденные изменения концентрации поверхностных комплексов с увеличением рН раствора представлены на рис. 2.

Согласно модели строения двойного электрического слоя (ДЭС) Грэма–Парсона (рис. 1), величина заряда поверхности диоксида q_0 определяется зарядами в различных плоскостях ДЭС и тремя скачками потенциала на границах: диоксид/внутренняя плоскость Гельмгольца (ИНР) – $(\varphi_0 - \psi_1 = q/K_{01})$; ИНР/внешняя плоскость Гельмгольца (ОНР) – $(\psi_1 - \psi_2 = q_2/K_{12})$ и диффузная часть ДЭС/водный раствор электролита ψ_2

$$\varphi_0 = (\varphi_0 - \psi_1) + (\psi_1 - \psi_2) + \psi_2 = q/K_{01} - q_2/K_{12} + \psi_2, \quad (5)$$

где K_{12} – емкость между ИНР и ОНР; K_{01} – емкость между поверхностью оксида и ИНР.

Величина заряда q компенсируется противоионами, образующими заряд q_1 , а также суммарным зарядом ионов в диффузном слое q_2 (см. рис. 1)

$$q_0 = q + q_1 + q_2 = 0. \quad (6)$$

Величины зарядов могут быть выра-

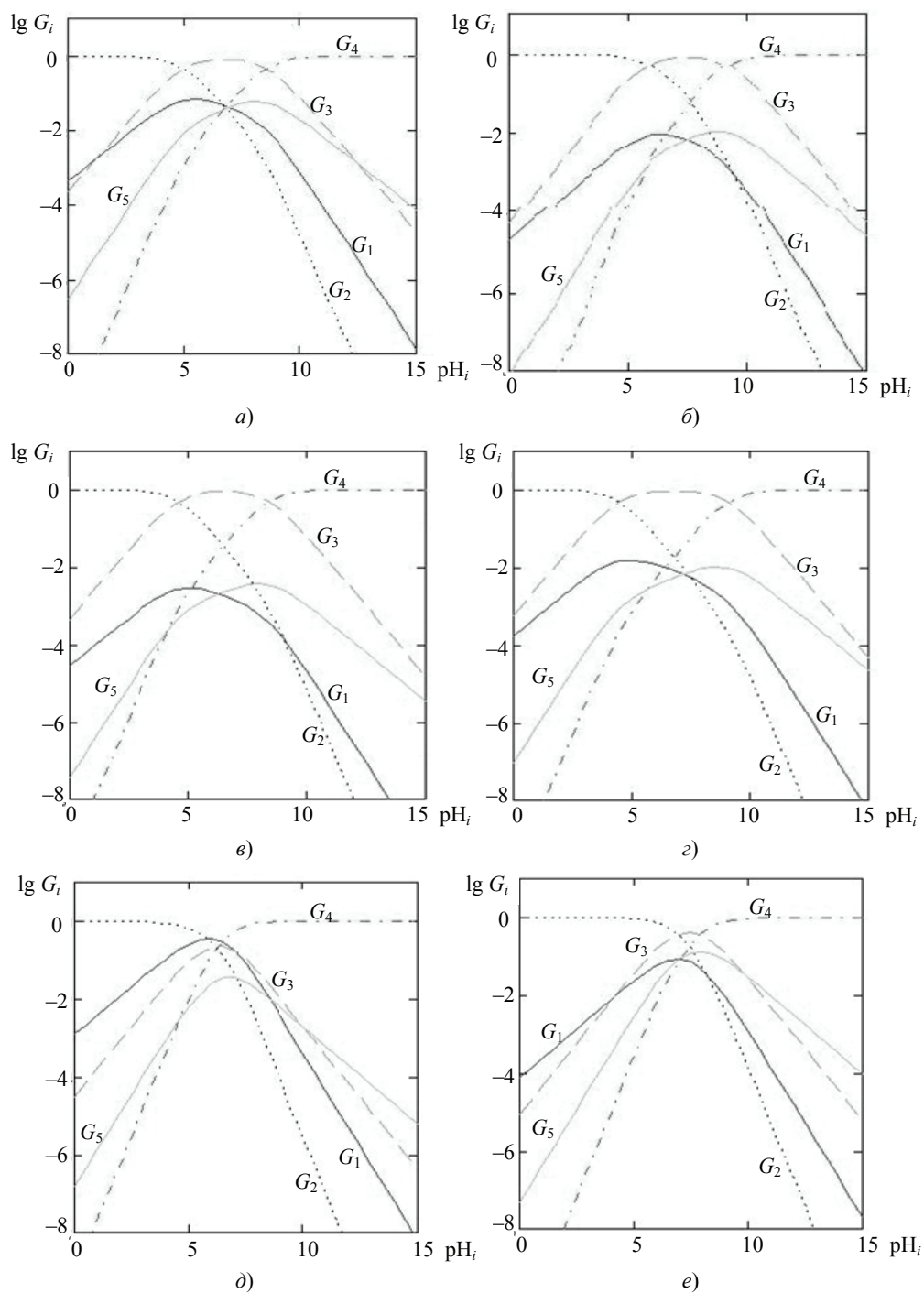


Рис. 2. Зависимость логарифма концентрации поверхностных комплексов от pH на границе гидратированный диоксид/водный раствор электролита (концентрация раствора KCl 0,05 моль/л): G_1 – MOH_2^+ ; G_2 – $\text{MOH}_2^+ \cdots \text{Cl}^-$; G_3 – MOH^0 ; G_4 – $\text{MO}^- \cdots \text{K}^+$; G_5 – MO^- ; а – $\text{SnO}_2 \cdot 1,75\text{H}_2\text{O}$; б – $\text{TiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$; в – $\text{HfO}_2 \cdot 2,3\text{H}_2\text{O}$; г – $\text{ZrO}_2 \cdot 2,5\text{H}_2\text{O}$; д – GeO_2 (коммерческий образец); е – PbO_2 (коммерческий образец)

Как видно из рис. 2 при увеличении pH значения логарифма концентрации поверхностных комплексов $\equiv \text{MOH}_{2,s}^+$; $\equiv \text{MOH}_s^0$ и $\equiv \text{MO}_s^-$ проходят через максимум. Эти значения характеризуют особенности взаимодействия поверхностных комплексов с частицами раствора. С целью исключения влияния катионов K^+ и анионов Cl^- на процесс кислотно-основного взаимодействия поверхности гидратированных диоксидов и раствора значения максимумов показателей концентраций поверхностных комплексов:

$$p\text{MOH}_2 = -\lg[\text{MOH}_2^+]; \quad p\text{MOH} = -\lg[\text{MOH}]; \quad p\text{MO} = -\lg[\text{MO}^-], \quad (16)$$

и pH были графически экстраполированы на нулевое значение концентраций солей фона $c_{\text{KCl}} \rightarrow 0$ в растворе. Полученные, таким образом, значения максимумов показателей концентраций поверхностных комплексов на границе гидратированный диоксид/водный раствор электролита и соответствующие им величины pH сведены в табл. 2 и 3.

Таблица 2

Зависимость максимумов показателей концентрации поверхностных комплексов на границе диоксид/раствор электролита от pH для гидратированных диоксидов титана, олова, циркония и гафния

Гидратированный диоксид (исходная форма)	Показатели концентрации поверхностных комплексов	Температура обработки, °C							
		50		120		200		700	
		max	pH	max	pH	max	pH	max	pH
$\text{TiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	pTiOH ₂	2,12	6,58	1,68	6,41				
	pTiOH	0,04	7,55	0,07	6,98	–	–	–	–
	pTiO	2,00	8,53	1,80	7,93				
$\text{SnO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	pSnOH ₂	1,14	5,98	1,55	5,27	1,62	4,62	1,55	4,68
	pSnOH	0,09	6,62	0,00	6,76	0,00	6,31	0,00	6,62
	pSnO	1,35	7,83	1,97	8,57	2,25	8,30	2,98	8,17
$\text{ZrO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	pZrOH ₂	1,86	5,41	1,73	5,04	1,94	5,63	1,47	4,50
	pZrOH	0,00	6,56	0,00	6,62	0,01	7,10	0,00	6,06
	pZrO	2,06	8,62	2,02	8,56	1,99	8,90	2,89	7,93
$\text{HfO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	pHfOH ₂	2,56	5,45	2,50	5,05	2,67	5,68	2,04	4,92
	pHfOH	0,06	6,53	0,00	7,05	0,02	6,86	0,00	6,63
	pHfO	2,44	7,68	2,56	8,54	2,60	8,60	2,64	8,05

Таблица 3

Зависимость максимумов показателей концентрации поверхностных комплексов на границе диоксид/водный раствор электролита от pH для коммерческих образцов диоксидов германия и свинца

Диоксид	Показатель концентрации поверхностных комплексов					
	pMOH ₂		pMOH		pMO	
	max	pH	max	pH	max	pH
GeO ₂ (гексагон.)	0,42	5,89	0,63	6,36	1,38	6,68
PbO ₂ (тетрагон.)	1,13	7,06	0,32	7,49	0,87	7,78

Как следует из данных таблиц значения максимумов $p\text{MOH}_2$ в большинстве случаев ниже таковых $p\text{MO}$, а это значит, что число активных центров адсорбирующих катионы водорода больше числа центров десорбирующих их по кислотному механизму. В ряде случаев эти величины весьма близки: $\text{TiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ (50 и 120 °C); $\text{ZrO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ (200 °C); $\text{HfO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ (50, 120, 200 °C), то есть на поверхности этих диоксидов количества атомных групп, взаимодействующих с катионами водорода, и групп, диссоциирующих по кислотному механизму, практически одинаковы.

И только в случае PbO_2 сравнение этих показателей позволяет констатировать, что число атомных групп, диссоциирующих по кислотному механизму, больше атомных групп, адсорбирующих катионы водорода. В данном случае это вполне объясняется эффектом переноса заряда $\text{Pb} \leftarrow \text{O}$, что уменьшает возможность адсорбции катионов водорода группами $\equiv \text{PbOH}$.

Сравнивая полученные значения для $\equiv \text{MOH}^0$, $\equiv \text{MOH}_2^+$ и $\equiv \text{MO}^-$, можно заключить, что концентрации $[\text{MOH}^0]$ много больше концентраций $[\text{MOH}_2^+]$ и $[\text{MO}^-]$, следовательно, в адсорбционном взаимодействии и диссоциации по кислотному механизму принимает участие лишь часть гидроксогрупп поверхности диоксидов.

Сравнение значений $p\text{H}$, при которых концентрации $[\text{MO}^-]$ максимальны позволяет подчеркнуть, что только для GeO_2 это значение лежит в кислой области ($p\text{H} = 6,68$). Следовательно, атомные группы поверхности $\equiv \text{GeOH}$ значительно активнее диссоциируют по кислотному механизму в сравнении с таковыми группами других гидратированных диоксидов.

Из таблиц 2 и 3 также следует, что чем больше воды в структуре гидратированного диоксида, тем меньше значение $p\text{H}$, при котором концентрация $[\text{MOH}_2^+]$ достигает максимума, то есть молекулы воды мешают процессу адсорбции протонов на активные центры поверхности.

Зависимость значений показателей максимумов концентраций поверхностных комплексов $\equiv \text{MOH}_2^+$ и $\equiv \text{MO}^-$ от температуры высушивания гидратированных диоксидов представлена на рис. 3, из которого видно, что при повышении

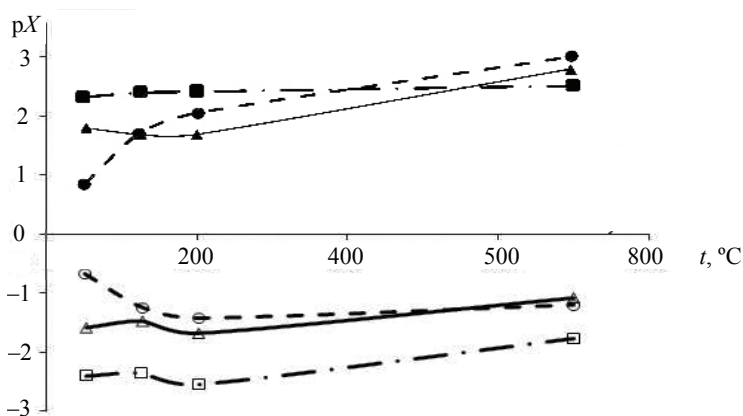
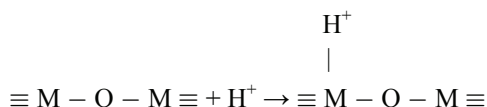


Рис. 3. Зависимости $p[\text{MOH}_2^+]$ (не заштрихованные точки) и $p[\text{MO}^-]$ (заштрихованные точки) от температуры нагрева гидратированного диоксида: ● — Sn; ▲ — Zr; ■ — Hf

температуры нагревания с 200 до 700 °С $p\text{MOH}_2$ для гидратированных диоксидов олова, циркония и гафния уменьшаются, а $p\text{MO}$ увеличиваются. Увеличение значений $p\text{MO}$ обусловлено уменьшением числа $\equiv \text{MOH}$ групп поверхностей этих гидратированных диоксидов, способных к взаимодействию по кислотному механизму.

Факт уменьшения значений $p\text{MOH}_2$, то есть увеличение концентрации $[\text{MOH}_2^+]$ на фоне уменьшения количества $\equiv \text{MOH}$ групп на поверхности гидратированных диоксидов с ростом температуры их высушивания, позволяет указать на увеличение числа элементарных актов взаимодействия катионов водорода с поверхностью гидратированного диоксида по схеме:



Выводы

1. Для всех исследованных гидратированных диоксидов число активных центров, адсорбирующих катионы водорода, больше числа центров, диссоциирующих по кислотному механизму.
2. В адсорбционном взаимодействии и диссоциации по кислотному механизму принимает участие лишь часть гидроксогрупп поверхности гидратированных диоксидов.
3. С увеличением температуры нагревания $\text{MO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ кислотные свойства соединений ослабевают, что объясняется уменьшением числа гидроксильных групп, способных к взаимодействию по кислотному механизму.

Список литературы

1. Печенюк, С.И. Адсорбционные свойства гидрогелей оксигидратов переходных и *p*-металлов / С.И. Печенюк // Изв. Рос. акад. наук. Сер. Химия. – 1999. – № 2. – С. 229–238.
2. High Selectivity of CVD Tin Dioxide/Silica Catalyst for Oxidative Dehydrogenation of Ethylbenzene / T. Hattori [and others] // Preparation of Catalysts IV / Ed. B. Delmon [and others]. – Amsterdam : Elsevier. – 1987. – P. 113.
3. Зависимость кислотно-основных свойств гидратированного диоксида гафния от температуры его предварительной обработки / А.В. Кострикин [и др.] // Журн. неорг. хим. – 2000. – Т. 45, № 11. – С. 1932–1936.
4. Косенкова, О.В. Синтез, строение и кислотные свойства гидратированных диоксидов элементов подгрупп германия и титана : дис. ... канд. хим. наук : 02.00.01 / Ольга Владимировна Косенкова. – М., 2009. – 162 с.
5. Горичев, И.Г. Расчет и анализ кривых в методе кислотно-основного титрования / И.Г. Горичев, Т.К. Атанасян, В.С. Дуняшев. – М. : Изд-во Моск. гос. открытого пед. ун-та, 1993. – 30 с.
6. Горичев, И.Г. Определение констант кислотно-основных равновесий на границе оксид/раствор методом потенциометрического титрования / И.Г. Горичев, С.А. Коньков, В.В. Батраков // Электрохимия. – 1993. – Т. 29, № 3. – С. 310–314.
7. Constants of Acid – Base Equilibria of the $\text{ZrO}_2/\text{electrolyte}$ Interface / V.V. Batrakov [and others] // Rus. Jour. Phys. Chem. – 2000. – Vol. 74, No. 3. – P. 553–558.
8. Использование MathCad для моделирования и расчета кислотно-основных равновесий / И.В. Соколов [и др.]. – М. : Прометей, 2007. – 93 с.

Surface Complexes on the Border of Hydrated Dioxides/Water Solutions with Different pH Levels

A.V. Kostrikin¹, O.V. Kosenkova², I.G. Gorichev⁴,
F.M. Spiridonov⁵, L.N. Komissarova⁵, I.V. Linko⁶,
D.V. Pankratov⁴, L.P. Kostrikina³, R.V. Kuznetsova²,
B.E. Zaitsev⁷

Department "Chemistry", Michurinsk State Teachers' Training Institute (1); departments: "Chemistry" (2), "Mathematics and Modeling of Economic Systems" (3), Michurinsk State Agrarian University, Michurinsk; department "Physical Chemistry", Moscow State Teachers' Training University (4); department "Non-Organic Chemistry", Moscow State University named after M.V. Lomonosov (5); departments: "Non-Organic Chemistry" (6), "General Chemistry" (7), Russian University of Peoples' Friendship, Moscow; AVKostrikin@rambler.ru

Key words and phrases: hydrate dioxide; potentiometer titration; surface complexes; indexes of concentrations maximums.

Abstract: The results of potentiometer titration of suspension of hydrated dioxides subgroups of germanium and titanium are produced. Within the framework of the existing models we have found the dependence of the surface complexes concentration on the border of hydrated dioxide/water-electrolyte solution from pH solution and temperature of the produced hydrated dioxides.

Oberflächliche Komplexe an der Grenze "Wasserbeladene Dyoxide/Wasserlösungen" mit dem verschiedenen pH-Wert

Zusammenfassung: Laut Ergebnissen des potentiometrischen Titrierens der Suspensionen der wasserbeladenen Dyoxiden der Untergruppen des Germaniums und des Titans in den Rahmen der existierenden Modelle ist die Abhängigkeit der Konzentration der oberflächlichen Komplexe an der Grenze "Wasserbeladene Dyoxide/Wasserlösungen des Elektrolytes" von der pH-Größe der Lösung und der Temperatur des Erhaltens des wasserbeladenen Dyoxides gefunden.

Complexes superficiels sur la frontière dioxides hydratés/solution d'eau d'électrolyte avec une différente valeur de pH

Résumé: D'après les résultats du titrage potentiométrique des suspensions des dioxides hydratés des sous-groupes du germanium et du titane dans le cadre des modèles existants est trouvée la dépendance de la concentration des complexes superficiels sur la frontière dioxides hydratés/solution d'eau d'électrolyte de la valeur de pH de la solution et de la température de l'obtention du dioxyde hydraté.

Авторы: *Кострикин Александр Валентинович* – кандидат химических наук, доцент кафедры «Химия», ФГБОУ ВПО «Мичуринский государственный педагогический институт»; *Косенкова Ольга Владимировна* – кандидат химических наук, ассистент кафедры «Химия», ФГБОУ ВПО «Мичуринский государственный аграрный университет», г. Мичуринск; *Горичев Игорь Георгиевич* – доктор химических наук, профессор кафедры «Физическая химия», ФГБОУ ВПО «Московский педагогический государственный университет»; *Спиридонов Феликс Максимилович* – кандидат химических наук, доцент, старший научный сотрудник кафедры «Неорганическая химия»; *Комиссарова Лидия Николаевна* – доктор химических наук, профессор кафедры «Неорганическая химия», ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова»; *Линько Иван Владиславович* – кандидат химических наук, доцент кафедры «Неорганическая химия», ФГБОУ ВПО «Российский университет дружбы народов»; *Панкратов Дмитрий Владимирович* – кандидат химических наук кафедры «Физическая химия», ФГБОУ ВПО «Московский педагогический государственный университет», г. Москва; *Кострикина Лариса Петровна* – старший преподаватель кафедры «Математика и моделирование экономических систем»; *Кузнецова Римма Валерьевна* – кандидат химических наук, доцент кафедры «Химия», ФГБОУ ВПО «Мичуринский государственный аграрный университет», г. Мичуринск; *Зайцев Борис Ефимович* – доктор химических наук, профессор кафедры «Общая химия», ФГБОУ ВПО «Российский университет дружбы народов», г. Москва.

Рецензент: *Ковальчукова Ольга Владимировна* – доктор химических наук, профессор кафедры «Общая химия», ФГБОУ ВПО «Российский университет дружбы народов», г. Москва.
