

КИНЕТИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСТВОРЕНИЯ ОКСИДОВ ПЕРЕХОДНЫХ МЕТАЛЛОВ В КИСЛОТНОЙ СРЕДЕ

Е.А. Елисеева

yakusheva@bmstu.ru

С.Л. Березина

sberezina@bmstu.ru

В.С. Болдырев

boldyrev.v.s@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Исследование закономерностей растворения оксидных фаз переходных металлов является актуальным при решении задач, связанных с оптимизацией выделения соединений металлов из обедненных руд, с процессами выщелачивания и обогащения, травления металлов и очистки их соединений. Накопленный экспериментальный материал относится к частным вопросам взаимодействия оксидов *d*-металлов в растворах различного состава. Для установления общих критериев процессов и механизмов их протекания необходимо обобщить данные о кинетических закономерностях растворения твердых фаз *d*-металлов с использованием современных представлений. Приведены результаты изучения кинетики растворения диоксидов титана, циркония, гафния в кислотной среде. Получены кинетические характеристики, определен характер кинетических кривых. Установлена зависимость растворения оксидов от концентрации серной кислоты. Полученные данные интерпретированы с учетом констант кислотно-основных равновесий, устанавливающихся на границе оксид металла/раствор электролита. Проведен сравнительный анализ экспериментальных и теоретических данных, характеризующих кинетические закономерности растворения оксидов. Осуществлено моделирование процесса, предложена схема растворения. Показано, что растворение оксидных фаз металлов подгруппы титана в кислотной среде сопровождается образованием промежуточных адсорбционных комплексов. Вследствие разной способности гидроксогрупп

Ключевые слова

Кинетика растворения, оксиды металлов, удельная скорость, поверхностно-активные частицы, адсорбция, кислотно-основная модель, механизм окисления

к присоединению ионов водорода кислотные свойства в ряду TiO_2 , ZrO_2 , HfO_2 уменьшаются. Полученные результаты могут быть информативны при изучении кинетических характеристик оксидов переходных металлов и в практических приложениях для оптимизации процессов их растворения в кислотных средах

Поступила 03.04.2023

Принята 03.07.2023

© Автор(ы), 2024

Работа выполнена по программе Госзадания (№ FSN-2023-0004)

Введение. Оксиды переходных металлов, в частности металлы подгруппы титана, применяют в различных отраслях промышленности в силу их уникальных свойств [1]. Использование соединений таких металлов в производстве электронной техники, источников тока и при получении гальванических покрытий, а также необходимость оптимизации этих технологий требуют более детального изучения процессов на границе раздела оксид d -металла/раствор электролита.

В силу высокой фотокаталитической активности TiO_2 применяется в качестве катализатора для чистки от органических загрязнений, в солнечных батареях [2, 3]. Малая теплопроводность диоксида циркония ZrO_2 обуславливает его применение при производстве лопаток газовых турбин, в ракетных и реактивных двигателях, и антиотражающих покрытиях летательных аппаратов, в качестве защитных оболочек ядерных реакторов. Диоксиды циркония и гафния применяют в производстве тонкопленочных полупроводников, сохраняющих высокую диэлектрическую проницаемость в широком температурном интервале [4]. Гафний интенсивно поглощает тепловые нейтроны (поперечное сечение захвата 115 барн), что обуславливает его применение в производстве регулирующих стержней для ядерных реакторов. Способность диоксида гафния HfO_2 к поглощению гамма- и рентгеновского излучения определяет его применение в рентгеновских люминофорах и сцинтилляторах [5].

Имеющиеся в литературе данные связаны с частными вопросами растворения оксидов d -металлов. Обобщение данных по кинетике их растворения является актуальным для разработки современных методов выделения соединений металлов из руд. Характеристики, регулирующие протекание равновесных процессов растворения оксидов, определяются их кислотно-основными свойствами.

Цель работы — изучение растворения диоксидов титана, циркония, гафния в растворах H_2SO_4 , определение кинетических параметров и мо-

делирование процессов с учетом значений констант кислотно-основных равновесий.

Материалы и методы исследования. В термостатированный реактор, содержащий 0,5 л раствора H_2SO_4 (в диапазоне значений концентрации 5...14,5 моль/л), помещали 0,5 г порошкообразной навески гидратированного оксида, перемешивание смеси осуществляли магнитной мешалкой. Периодически отбирали пробы объемом 5 мл фильтром Шотта № 4. Концентрации ионов определяли спектрофотометрически измерением оптической плотности фильтрата. Ионы титана определяли по образованию пероксидного комплекса желтого цвета при добавлении концентрированного пероксида водорода; содержание ионов циркония и гафния устанавливали с использованием индикатора Арсеназо III, образующего в кислотной среде растворимые в воде комплексы изумрудно-зеленого цвета. Статистические методы обработки данных проводились с использованием программ *MatLAB*, *Origin*, *MathCAD* [6].

Результаты исследования и их обсуждение. Согласно современным представлениям, при растворении оксидов металлов образуются поверхностные комплексы металла с анионами среды, переходящие в водную среду [7, 8]. Процесс сопровождается поверхностной адсорбцией катионов и анионов электролита, в том числе ионов H^+ , образующихся при диссоциативной хемосорбции воды. При моделировании процессов также необходимо учитывать первоначальное состояние образцов, методику их подготовки к исследованиям [9–11].

Каталитическая и адсорбционная активности оксидных фаз связаны с их кислотно-основными свойствами. При определении констант кислотно-основного равновесия используют термодинамические и кинетические расчеты, применяют методы ИК-спектроскопии, потенциометрического титрования, адсорбционные измерения и др. [12, 13].

Согласно модельным представлениям [7, 10, 14], при неполном растворении оксидной фазы на границе раздела оксид металла/электролит устанавливается квазиравновесное состояние. Полученные экспериментальные данные (рис. 1) приведены в координатах время растворения–мольная доля растворенного оксида α , которую рассчитывали по результатам измерения оптической плотности пробы фильтрата при истечении заданного времени растворения.

Кривые растворения ZrO_2 и TiO_2 имеют σ - и s -образный вид и выделяются наличием участков ускорения и замедления растворения. Активное начальное ускорение процесса связано с формированием фронта

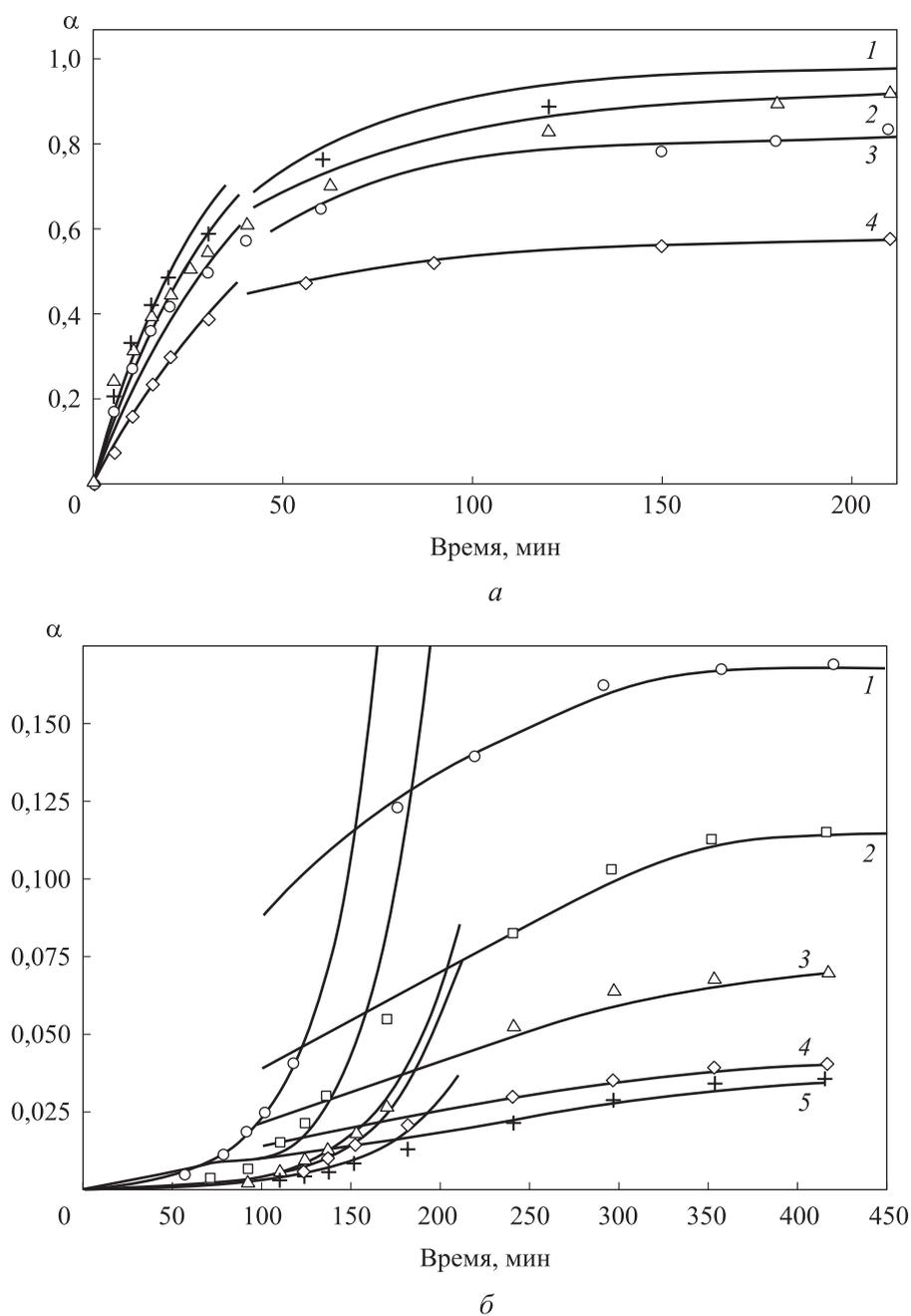


Рис. 1. Зависимости мольной доли растворенного ZrO_2 (а) и TiO_2 (б) от времени при различных значениях концентрации H_2SO_4 (точки — эксперимент; линии — графическое решение):
 а — 14,5 (1), 9 (2), 7 (3) и 5 моль/л (4); б — 14,5 (1), 13,5 (2), 9 (3), 18 (4) и 12 моль/л (5)
 (отдельно выделены начальные восходящие участки кривых 1–5 с активным растворением оксида вследствие распространения активных центров; конечные участки кривых 1–5 показывают замедление процесса растворения)

растворения и наблюдается до установления равновесного состояния при неполном растворении оксида. С повышением концентрации H_2SO_4 доля растворенного оксида возрастает.

Удельная скорость растворения оксида: $W : \partial\alpha / \partial t = Wf(\alpha)$, где $f(\alpha)$ — функция, учитывающая степень протекания реакции в зависимости от площади реакционной поверхности оксида.

Зависимость удельной скорости растворения оксидов от концентрации H_2SO_4 (рис. 2) удовлетворительно описывается уравнением

$$W_i = W \frac{[H^+]}{K_\alpha + [H^+]_{\max}}$$

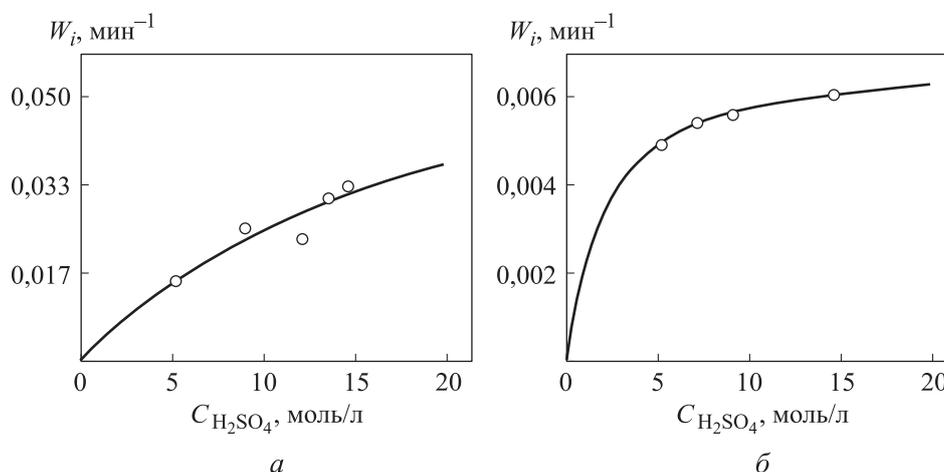


Рис. 2. Зависимости удельной скорости растворения TiO_2 (а) и ZrO_2 (б) от концентрации H_2SO_4 (точки — эксперимент, линия — результаты моделирования)

При расчете значений W_{\max} и K_α применяли методы нелинейной регрессии. Расчетные значения параметров растворения приведены ниже:

	TiO_2	ZrO_2
$W_{\max}, \text{мин}^{-1}$	0,037	0,006
$K_\alpha, \text{моль/л}$	4,4	4,1

Для объяснения активного ускорения растворения оксидов использовали теорию, основанную на применении механизма цепного разветвления центров растворения. Предполагалось, что ускорение растворения обусловлено разветвлением активных центров, когда каждый образо-

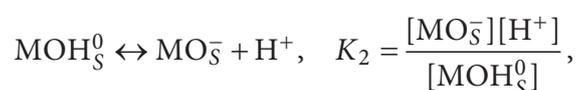
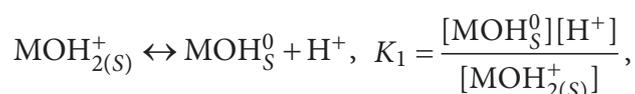
вавшийся зародыш способствует быстрому возникновению множества других. Скорость растворения определяется скоростью зародышеобразования, скоростью разветвления зародышей и скоростью их растворения. При проведении расчетов (таблица) использовали модель анизотропного растворения на дефектных участках поверхности (дислокации и другие дефекты), модель цепного механизма с участием промежуточных продуктов растворения за счет адсорбируемых ионов H^+ и образования в растворе ионных пар $H^+ - A^-$ [15, 16].

Для конечного периода неполного растворения применяли уравнение равновесной реакции первого порядка $\ln(1 - \alpha / \alpha_\infty) = Wt$, где α_∞ — предельная доля растворения оксида.

Кинетические параметры растворения TiO_2 и ZrO_2 в H_2SO_4

Оксид	$C_{H_2SO_4}$, моль/л	Начальные участки, цепной механизм	Конечные участки	
		$W, 10^3, \text{мин}^{-1}$	$W, 10^{-3}, \text{мин}^{-1}$	α_∞
TiO_2	9,0	25	1,3	0,17
	12,0	23	2,8	0,34
	13,5	31	2,1	0,21
	14,5	33	6,4	0,19
ZrO_2	5	4,9	28	0,57
	7	5,4	30	0,82
	9	5,6	29	0,91
	14,5	6,1	30	0,98

Установившиеся равновесия на границе раздела гидратированный оксид металла/раствор электролита соответствуют процессам [17]:



где K_1, K_2 — константы кислотно-основных равновесий (индексом S обозначены поверхностные частицы, участвующие в адсорбционном равновесии).

Сопоставление результатов расчета значений констант для диоксидов титана, циркония, гафния показало, что значение константы K_1 зависит от природы оксида:

	TiO ₂	ZrO ₂	HfO ₂
K ₁	2,5	3,8	4,2
K ₂	9,5	9,5	9,4

В ряду TiO₂, ZrO₂, HfO₂ кислотные свойства уменьшаются, что определяется различной способностью гидроксогрупп присоединять ионы водорода.

Установленные закономерности могут быть использованы для оптимизации технологии извлечения металлов из руд и концентратов, так как процесс растворения — важная стадия гидрохимического извлечения металлов из руд. Расчет экономической эффективности зависит от химического состава исходного сырья и требований, предъявляемых к производительности процесса [18–21].

Заключение. Экспериментально исследованы процессы растворения TiO₂, ZrO₂, HfO₂ в водных растворах серной кислоты различной концентрации.

Результаты анализа кинетических кривых показали, что с повышением концентрации серной кислоты в диапазоне значений 5...14,5 моль/л доля растворенного оксида возрастает.

Обобщение экспериментальных данных потенциометрического титрования суспензий оксидов, по которым проводили расчеты констант кислотно-основных равновесий, и теоретических данных, интерпретирующих кинетические закономерности растворения оксидов, показало, что процесс растворения сопровождается образованием промежуточных адсорбционных комплексов, изменение концентраций которых зависит от pH раствора.

Сопоставлением констант кислотно-основных равновесий установлено уменьшение кислотных свойств в ряду TiO₂, ZrO₂, HfO₂. Это объясняется различной способностью гидроксогрупп к присоединению ионов водорода, о чем свидетельствует различие рассчитанных значений констант.

Полученные результаты могут быть учтены при изучении кинетических характеристик оксидов переходных металлов и при оптимизации производственных процессов, связанных с растворением оксидов металлов подгруппы титана в кислотных средах.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Woodley S.M., Hamad S., Mejías J.A., et al. Properties of small TiO₂, ZrO₂ and HfO₂ nanoparticles. *J. Mater. Chem.*, 2006, vol. 16, iss. 20, pp. 1927–1933.
DOI: <https://doi.org/10.1039/B600662K>
- [2] Пугачевский М.А., Мамонтов В.А., Николаева С.Н. и др. Влияние размерного фактора на структуру и физико-химические свойства наночастиц диоксида титана. *Известия Юго-Западного государственного университета. Сер. Техника и технологии*, 2021, т. 11, № 2, с. 104–118. EDN: BMLSHO
- [3] Gupta S.M., Tripathi M. A review of TiO₂ nanoparticles. *Chinese Sci. Bull.*, 2011, vol. 56, no. 16, pp. 1639–1657. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11434-011-4476-1>
- [4] Perevalov T.V, Gritsenko V.A. Application and electronic structure of high permittivity dielectrics. *Phys.-Usp.*, 2010, vol. 53, iss. 6, pp. 561–576.
DOI: <http://dx.doi.org/10.3367/UFNe.0180.201006b.0587>
- [5] Kirm M., Aarik J., Jugens M., et al. Thin films of HfO₂ and ZrO₂ as potential scintillators. *Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. B.*, 2005, vol. 537, iss. 1-2, pp. 251–255.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2004.08.020>
- [6] Соколов И.В. Использование MathCad для моделирования и расчета кислотно-основных равновесий. М., Прометей, 2007.
- [7] Елисеева Е.А., Березина С.Л., Болдырев В.С. и др. Моделирование процесса растворения железа Fe₃O₄ в кислотной среде. *Черные металлы*, 2020, № 10, с. 15–20. EDN: QMDPMM
- [8] Киприянов Н.А., Горичев И.Г. Моделирование выщелачивания с использованием кислотно-основных свойств окисленных минералов в гидрометаллургии. *Вестник РУДН. Сер. Инженерные исследования*, 2008, № 3, с. 73–78. EDN: JKGLOJ
- [9] Елисеева Е.А., Березина С.Л., Горичев И.Г. и др. Влияние поверхностной структуры оксида Co₃O₄ на кинетику растворения в кислотном электролите. *Металлы*, 2022, № 1, с. 48–54. EDN: EGANCR
- [10] Елисеева Е.А., Березина С.Л., Болдырев В.С. и др. Влияние морфологии частиц Co₂O₃ на кинетику растворения в электролитах. *Цветные металлы*, 2020, № 11, с. 14–18. DOI: <https://doi.org/10.17580/tsm.2020.11.02>
- [11] Паукштис Е.А. Инфракрасная спектроскопия в гетерогенном кислотно-основном катализе. Новосибирск, Наука, 1992.
- [12] Eliseeva E.A., Berezina S.L., Goritchev I.G., et al. Anodic dissolution of cobalt in sulfate electrolyte. *Int. J. Corros. Scale Inhib.*, 2022, vol. 11, no. 1, pp. 151–160.
DOI: <http://dx.doi.org/10.17675/2305-6894-2022-11-1-8>
- [13] Русакова С.М., Горичев И.Г., Артамонова И.В. и др. Изучение свойств TiO₂ в контексте решения научно-практических проблем промышленного производства. *Известия МГТУ МАМИ*, 2010, № 2, с. 179–184.
DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-69731>

- [14] Горичев И.Г., Изотов А.Д., Кишкина К.А. и др. Использование представлений о строении двойного электрического слоя в методах экспериментального определения и расчета констант кислотно-основных равновесий на границе оксид/электролит. М., РУДН, 2001.
- [15] Batrakov V.V., Khlupov A.Yu., Gorichev I.G., et al. Constants of acid-base equilibria at the ZrO_2 /electrolyte interface. *Rus. Jour. Phys. Chem.*, 2000, vol. 74, suppl. 3, pp. 553–558. EDN: LGCEKV
- [16] Кострикин А.В., Горичев И.Г., Линько И.В. и др. Особенности строения и кислотно-основные свойства гидратированных диоксидов циркония, гафния, олова и свинца. *Журнал неорганической химии*, 2005, т. 50, № 3, с. 389–396. EDN: HRYTNT
- [17] Аверина Ю.М., Калякина Г.Ю., Меньшиков В.В. и др. Проектирование процессов нейтрализации хромо- и цианосодержащих сточных вод на примере гальванического производства. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2019, № 3 (84), с. 70–80. EDN: VVVGUP.
DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2019-3-70-80>
- [18] Богомоллов Б.Б., Болдырев В.С., Зубарев А.М. и др. Интеллектуальный логико-информационный алгоритм выбора энергоресурсоэффективной химической технологии. *Теоретические основы химической технологии*, 2019, т. 53, № 5, с. 483–492. EDN: KPDGXM. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0040357119050026>
- [19] Kuzin E., Averina Yu., Kurbatova A., et al. Titanium-containing coagulants in wastewater treatment processes in the alcohol industry. *Processes*, 2022, vol. 10, iss. 3, art. 440. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr10030440>
- [20] Болдырев В.С., Аверина Ю.М., Меньшиков В.В. и др. Технологически-организационный инжиниринг окрасочных производств. *Теоретические основы химической технологии*, 2020, т. 54, № 3, с. 299–303. EDN: KIXMMF.
DOI: <https://doi.org/10.31857/S004035712003001X>
- [21] Болдырев В.С., Кузнецов С.В., Меньшиков В.В. Инновационное развитие малотоннажных научно-производственных предприятий лакокрасочной отрасли. М., Пэйнт-Медиа, 2021.

Елисеева Елена Анатольевна — канд. хим. наук, доцент, доцент кафедры «Химия» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Березина Светлана Львовна — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Химия» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Болдырев Вениамин Станиславович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Химия» МГТУ им. Н.Э. Баумана; заведующий отделом «Инжиниринг химико-технологических систем» инжинирингового центра «Автоматика и робототехника» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Елисеева Е.А., Березина С.Л., Болдырев В.С. Кинетические закономерности растворения оксидов переходных металлов в кислотной среде. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2024, № 2 (113), с. 116–128.

EDN: NQDAXS

**KINETIC REGULARITIES OF THE TRANSITION
METAL OXIDES DISSOLUTION IN THE ACID MEDIUM**

E.A. Eliseeva

S.L. Berezina

V.S. Boldyrev

yakusheva@bmstu.ru

sberezina@bmstu.ru

boldyrev.v.s@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

Studying patterns of the transition metals oxide phase dissolution becomes relevant when solving problems related to the metal compounds optimization from depleted ore, to the leaching and enrichment processes, etching of metals and purification of their compounds. The accumulated experimental material relates to particular issues in the *d*-metal oxides interaction in solutions of various composition. To establish general criteria for processes and mechanisms of their occurrence, it is necessary to summarize data on kinetic patterns of the *d*-metals solid phase dissolution using the modern concepts. The paper presents results of studying dissolution kinetics of titanium, zirconium and hafnium dioxides in the acidic medium. Kinetic characteristics are obtained, and the kinetic curves nature is determined. Oxide dissolution dependence on the sulfuric acid concentration is established. The data obtained are interpreted taking into account the acid-base equilibrium constants established at the metal oxide/electrolyte solution interface. Experimental and theoretical data are comparatively compared characterizing the oxide dissolution kinetic patterns. The process is simulated, and a dissolution scheme is proposed. It is shown that dissolution of the titanium subgroup metals oxide phase in the acidic medium is accompanied by formation of the intermediate adsorption complexes. Due to different ability of the hydroxide groups to attach the hydrogen ions, acidic properties in the TiO₂, ZrO₂ and HfO₂ series

Keywords

Dissolution kinetics, metal oxides, specific rate, surfactants, adsorption, acid-base model, oxidation mechanism

decrease. The results obtained could be informative in studying kinetic characteristics of the transition metal oxides and in practical applications for optimizing their dissolution processes in the acidic media

Received 03.04.2023

Accepted 03.07.2023

© Author(s), 2024

The work was carried out according to the program of the State Assignment (no. FSFN-2023-0004)

REFERENCES

- [1] Woodley S.M., Hamad S., Mejías J.A., et al. Properties of small TiO₂, ZrO₂ and HfO₂ nanoparticles. *J. Mater. Chem.*, 2006, vol. 16, iss. 20, pp. 1927–1933. DOI: <https://doi.org/10.1039/B600662K>
- [2] Pugachevskiy M.A., Mamontov V.A., Nikolaeva S.N., et al. Influence of the size factor on the structure and physical and chemical properties of titanium dioxide nanoparticles. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Tekhnika i tehnologii* [Proceedings of the Southwest State University. Ser. Engineering and Technology], 2021, vol. 11, no. 2, pp. 104–118 (in Russ.). EDN: BMLSHO
- [3] Gupta S.M., Tripathi M. A review of TiO₂ nanoparticles. *Chinese Sci. Bull.*, 2011, vol. 56, no. 16, pp. 1639–1657. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11434-011-4476-1>
- [4] Perevalov T.V., Gritsenko V.A. Application and electronic structure of high permittivity dielectrics. *Phys.-Usp.*, 2010, vol. 53, iss. 6, pp. 561–576. DOI: <http://dx.doi.org/10.3367/UFNe.0180.201006b.0587>
- [5] Kirm M., Aarik, J., Jugens M., et al. Thin films of HfO₂ and ZrO₂ as potential scintillators. *Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. B.*, 2005, vol. 537, iss. 1-2, pp. 251–255. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2004.08.020>
- [6] Sokolov I.V. Ispolzovanie MathCad dlya modelirovaniya i rascheta kislotno-osnovnykh ravnovesiy [Using MathCad for modeling and calculation of acid-base balances]. Moscow, Prometey Publ., 2007.
- [7] Eliseeva E.A., Berezina S.L., Boldyrev V.S., et al. Modeling the process of dissolution of iron oxide Fe₃O₄ in an acidic environment. *Chernye metally*, 2020, no. 10, pp. 15–20 (in Russ.). EDN: QMDPMM
- [8] Kipriyanov N.A., Gorichev I.G. Modeling of leaching in hydrometallurgy oxidable minerals using their acid-basic properties. *Vestnik RUDN. Ser. Inzhenernye issledovaniya* [RUDN Journal of Engineering Research], 2008, no. 3, pp. 73–78 (in Russ.). EDN: JKGLOJ
- [9] Eliseeva E.A., Berezina S.L., Gorichev I.G., et al. Effect of the surface structure of the Co₃O₄ oxide on the dissolution kinetics in an acid electrolyte. *Russ. Metall.*, 2022, vol. 2022, no. 1, pp. 42–47. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0036029522010062>
- [10] Eliseeva E.A., Berezina S.L., Boldyrev V.S., et al. Influence of the morphology of Co₂O₃ particles on the dissolution kinetics in electrolytes. *Tsvetnye metally*, 2020, no. 11, pp. 14–18 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.17580/tsm.2020.11.02>

- [11] Paukshtis E.A. *Infrakrasnaya spektroskopiya v geterogennom kislotno-osnovnom katalize* [Infrared spectroscopy in heterogeneous acid-base catalysis]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1992.
- [12] Eliseeva E.A., Berezina S.L., Goritchev I.G., et al. Anodic dissolution of cobalt in sulfate electrolyte. *Int. J. Corros. Scale Inhib.*, 2022, vol. 11, no. 1, pp. 151–160. DOI: <http://dx.doi.org/10.17675/2305-6894-2022-11-1-8>
- [13] Rusakova S.M., Gorichev I.G., Artamonova I.V., et al. Study of TiO₂ properties for commercial production. *Izvestiya MGTU MAMI*, 2010, no. 2, pp. 179–184 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-69731>
- [14] Gorichev I.G., Izotov A.D., Kishkina K.A., et al. Ispolzovanie predstavleniy o stroenii dvoynogo elektricheskogo sloya v metodakh eksperimentalnogo opredeleniya i rascheta konstant kislotno-osnovnykh ravnovesiy na granitse oksid/elektrolit [Using ideas about electric double layer structure in methods of experimental determination and calculation of acid-base equilibrium constants at the oxide/electrolyte interface]. Moscow, RUDN Publ., 2001.
- [15] Batrakov V.V., Khlupov A.Yu., Gorichev I.G., et al. Constants of acid-base equilibria at the ZrO₂/electrolyte interface. *Rus. Jour. Phys. Chem.*, 2000, vol. 74, suppl. 3, pp. 553–558. EDN: LGCEKV
- [16] Kostrikin A.V., Gorichev I.G., Linko I.V., et al. Structural features and acid-base properties of hydrated zirconium, hafnium, tin, and lead dioxides. *Russ. J. Inorg. Chem.*, 2005, vol. 50, no. 3, pp. 339–345.
- [17] Averina Yu.M., Kalyakina G.Yu., Menshikov V.V., et al. Neutralisation process design for electroplating industry wastewater containing chromium and cyanides. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2019, no. 3 (84), pp. 70–80 (in Russ.). EDN: VVVGUP. DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2019-3-70-80>
- [18] Bogomolov B.B., Boldyrev V.S., Zubarev A.M., et al. Intelligent logical information algorithm for choosing energy- and resource-efficient chemical technologies. *Theor. Found. Chem. Eng.*, 2019, vol. 53, no. 5, pp. 709–718. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0040579519050270>
- [19] Kuzin E., Averina Y., Kurbatova A., et al. Titanium-containing coagulants in wastewater treatment processes in the alcohol industry. *Processes*, 2022, vol. 10, iss. 3, art. 440. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr10030440>
- [20] Boldyrev V.S., Averina Yu.M., Menshikov V.V., et al. Technological and organizational engineering of paint processing. *Theor. Found. Chem. Eng.*, 2020, vol. 54, no. 3, pp. 420–424. DOI: <https://doi.org/10.1134/S004057952003001X>
- [21] Boldyrev V.S., Kuznetsov S.V., Menshikov V.V. Innovatsionnoe razvitie malotonnazhnykh nauchno-proizvodstvennykh predpriyatiy lakokrasochnoy otrasli [Innovative development of small-tonnage scientific and production enterprises of paint and coating industry]. Moscow, Peynt-Media Publ., 2021.

Eliseeva E.A. — Cand. Sc. (Chem.), Assoc. Professor, Department of Chemistry, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Berezina S.L. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Chemistry, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Boldyrev V.S. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Chemistry, Bauman Moscow State Technical University; Head of the Department, Engineering of Chemical and Technological Systems, Engineering Center Automation and Robotics, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Eliseeva E.A., Berezina S.L., Boldyrev V.S. Kinetic regularities of the transition metal oxides dissolution in the acid medium. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2024, no. 2 (113), pp. 116–128 (in Russ.).

EDN: NQDAXS