

МОДЕЛИРОВАНИЕ КИНЕТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ РАСТВОРЕНИЯ ОКСИДОВ КОБАЛЬТА И МЕДИ В СЕРНОЙ КИСЛОТЕ

Е.А. Якушева¹

e.yakusheva@yandex.ru

И.Г. Горичев²

Т.К. Атанасян¹

О.Н. Плахотная³

В.Н. Горячева¹

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

² Московский педагогический государственный университет,

Москва, Российская Федерация

³ Первый Московский государственный медицинский университет

им. И.М. Сеченова, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Моделирование процессов растворения оксидов в кислотах показало, что лимитирующей стадией процесса растворения является переход комплексов оксидов, образующихся на поверхности, в раствор. Выполнен системный анализ кривых растворения ($\alpha - t$)-оксидов для расчета кинетических параметров (n_{H^+} , E_a). Установлено, что оксид кобальта растворяется в серной кислоте быстрее, чем оксид меди

Ключевые слова

Оксид кобальта, оксид меди, кинетика, растворение, моделирование, модель Бартона — Странского, метод Хоугена — Ватсона

Поступила в редакцию 20.09.2016
© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017

Введение. В настоящее время изучение и контроль физико-химических процессов растворения оксидов кобальта и меди в серной кислоте, оптимизация процессов выщелачивания руд, травление окалина с поверхности сталей, переработка промышленного сырья являются важными научно-техническими задачами [1–6]. Необходимы новые технологии и оптимальные условия для выделения соединений металлов из обедненных руд, так как запасы руд в мире, в том числе и в России, постепенно сокращаются, а успешная регенерация сдерживается отсутствием детальных экспериментальных исследований и недостаточной разработкой теории растворения оксидов. Для детального анализа имеющегося накопленного экспериментального материала требуется обобщенная модель растворения оксидных фаз [2, 7–12].

Оксиды меди и кобальта широко используют как катализаторы различных химических процессов (окисление метана, окисление угарного газа) [13, 14]. Их свойства характеризуются текстурой поверхности, которая определяет кинетику растворения оксидов. В связи с этим необходимо провести качественное исследование растворения этих веществ в растворах серной кислоты. Чем быстрее про-

исходит растворение оксидов, тем хуже его стабильность. Это особенно важно при выборе катализатора в химической реакции.

Систематические исследования растворения оксидов металлов позволяют количественно описать процессы растворения оксидов, связать поверхностные электрохимические явления на оксидах кобальта и меди с их кислотно-основными свойствами и механизмом растворения [15–21].

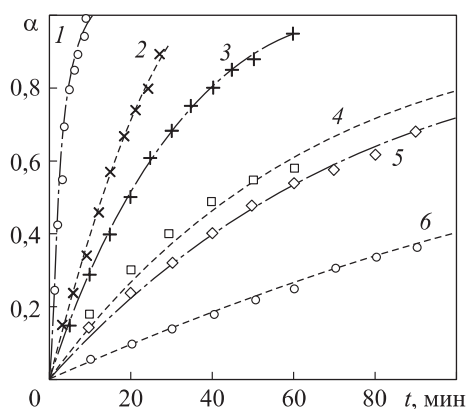
Цель настоящей работы — изучить кинетику растворения оксидов кобальта Co_3O_4 и меди CuO в растворе серной кислоты H_2SO_4 различной концентрации, провести моделирование процессов растворения оксидов с позиций гетерогенной кинетики.

Методика изучения кинетических закономерностей растворения оксидов кобальта и меди в серной кислоте. Для кинетических исследований выделялись фракции оксидов Co_3O_4 и CuO размером 80...100 мкм. Идентификацию исходных образцов оксидов проводили методом инфракрасной спектроскопии. Спектры образцов получали на спектрометре ИКС-16 и двухлучевом инфракрасном спектрофотометре UR-20. Термический анализ оксидов кобальта, никеля, железа и меди осуществляли на приборе ДТА-М-5.

Навеска оксидов массой 0,3 г вводилась в термостатируемый реактор, содержащий 0,5 л водного раствора серной кислоты заданной концентрации. Растворение оксидов проходило при непрерывном перемешивании с постоянной скоростью 800 мин^{-1} при различных значениях температуры (298...343 К). Концентрацию ионов кобальта определяли спектрофотометрическим роданидным методом, ионов меди — с помощью формальдоксида.

Полученные экспериментальные данные по влиянию концентрации, pH и температуры на кинетику растворения оксидов кобальта и меди представлены в координатах α – t на рис. 1 и рис. 2. Значения величины α рассчитаны по урав-

Рис. 1. Зависимость доли растворенного оксида кобальта Co_3O_4 от времени при значениях концентрации серной кислоты 10 (1), 5,93 (2), 2,97 (3), 1,0 (4), 0,57 (5), 0,12 (6) моль/л при $T = 363,2 \text{ К}$ (точки — экспериментальные данные, линии — расчетные значения, полученные по (1))



нению $\alpha = D_t / D_\infty$, где α — доля растворенного оксида; D_t , D_∞ — оптические плотности фильтрата в моменты времени t и $t = \infty$, когда происходит полное растворение оксида [22–30].

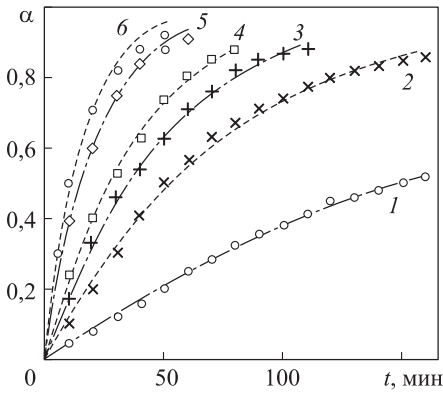


Рис. 2. Зависимость доли растворенного оксида меди CuO от времени ($T = 293 \text{ K}$, $\text{pH} = 2,05$) при значениях концентрации серной кислоты 0,25 (1), 0,5 (2), 1,0 (3), 2,5 (4), 5,0 (5), 7,5 (6) (точки — экспериментальные данные, линии — расчетные значения, полученные по уравнению (1))

Влияние концентрации минеральных кислот. В соответствии с анализом полученных данных, с повышением концентрации кислот доля растворенного оксида увеличивается при постоянной температуре.

Расчет кинетических параметров. Кинетические кривые, приведенные на рис. 1 и 2, имеют σ -образный вид, что указывает на большое число активных центров растворения. Для определения удельной скорости растворения W_i , эффективной энергии активации E_a , порядков реакции по различным ионам n_{H^+} осуществлен анализ методом аффинных преобразований, для чего использованы координаты $\alpha - t/t_{0,5}$ ($t_{0,5}$ — время растворения 50 % навески) [18–21].

Полученные инвариантные кривые $\alpha - t/t_{0,5}$ (рис. 3) по отношению к типу оксида, pH, температуре, составу раствора указывают на идентичный механизм процесса растворения оксидов, не зависящий от исследуемых параметров [18–21]. Особенность гетерогенной кинетики растворения — постоянство удельной скорости растворения и необходимость учета изменения поверхности частиц в процессе растворения.

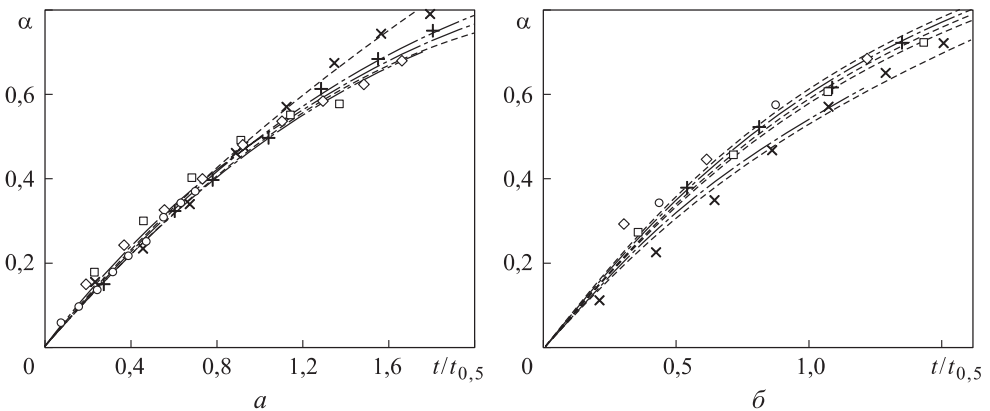


Рис. 3. Зависимости доли растворенного оксида кобальта Co_3O_4 (а) и оксида меди CuO (б) от приведенного времени ($t/t_{0,5}$) при различных значениях концентрации серной кислоты и $T = 363,2 \text{ K}$ (а), $T = 293 \text{ K}$ (б)

В этом случае скорость растворения оксида можно представить в виде функции с разделяющимися переменными в уравнении [10, 11]:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} = W_i f(\alpha),$$

где W_i — удельная скорость растворения, зависящая от концентрации ионов водорода, анионов, температуры; $f(\alpha)$ — функция, учитывающая характер изменения поверхности во времени.

Анализ экспериментальных данных с использованием критерия Фишера показал, что в качестве наиболее подходящих уравнений гетерогенной кинетики для описания процесса растворения можно использовать модель Бартона — Странского [18–22]:

$$\alpha = 1 - \exp[-A \cdot \text{Sh}(W_i t)], \quad \frac{\partial \alpha}{\partial t} = W_i (1 - \alpha) \sqrt{A^2 + \ln^2(1 - \alpha)}, \quad (1)$$

где A — константа, пропорциональная среднему числу активных центров (числу дефектов кристаллической решетки) на поверхности одной частицы оксида.

Уравнение (1) позволяет рассчитать значения W_i и установить зависимость скорости растворения от концентрации кислот, анионов, ионов водорода (рН).

Для поиска значений W_i , A применялись методы нелинейной регрессии с использованием программы *MathCad*.

Согласно проанализированным данным, приведенным в таблице, растворение оксидов кобальта и меди сравнимо по скоростям, хотя оксид кобальта Co_3O_4 растворяется чуть быстрее, чем оксид меди CuO (рис. 4). Порядок реакции по серной кислоте совпадает для двух оксидов (CuO , Co_3O_4) и равен 0,5.

Значения удельной скорости растворения оксидов Co_3O_4 , CuO в зависимости от концентрации H_2SO_4

$[\text{H}_2\text{SO}_4]$, моль/л	$\lg W_i$	$[\text{H}_2\text{SO}_4]$, моль/л	$\lg W_i$
Co_3O_4		CuO	
0,12	-2,9	0,25	-2,89
0,57	-2,5	0,5	-2,43
1,00	-2,4	1,0	-2,33
2,97	-2,1	2,5	-2,21
5,93	-1,9	5,0	-1,98
10,00	-1,6	7,5	-1,82

Полученные данные позволяют описать связь удельной скорости растворения оксидов Co_3O_4 , CuO от концентрации H_2SO_4 обобщенным уравнением

$$W_i = W_0 \left(\frac{[\text{H}^+]}{[\text{H}^+] + K_1} \right) \left(\frac{[\text{A}^-]}{[\text{A}^-] + K_2} \right), \quad (2)$$

где W_0 — удельная константа скорости растворения; K_1 , K_2 — величины, обратные константам адсорбции; $[\text{A}^-] \equiv [\text{HSO}_4^-]$.

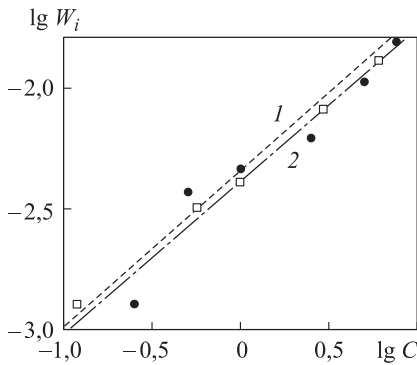


Рис. 4. Зависимость $\lg W_i$ [$\lg C(\text{H}_2\text{SO}_4)$] для моделей Бартона — Странского при растворении оксидов кобальта Co_3O_4 (1) и меди CuO (2) в серной кислоте (точки — экспериментальные значения, линии — графическое изображение зависимости (2))

Моделирование механизма растворения оксидов кобальта и меди в серной кислоте. Согласно существующим представлениям, процесс растворения оксидов в кислотах происходит на активных центрах оксидов, адсорбировавших ионы H^+ и ионные пары $\text{H}^+\text{-A}^-$. Существуют различные методы математического моделирования процессов растворения: метод маршрутов; метод стационарных концентраций; метод линейных последовательностей; метод Хоугена — Ватсона [25, 28].

Здесь был выбран метод Хоугена — Ватсона, который позволил провести моделирование зависимости скорости растворения оксидов от рН и концентрации кислот.

В этом случае скорость растворения (например, оксидов кобальта), в общем виде, будет выражаться уравнением [25, 28]:

$$W_i = W_0 \Gamma(\text{H}^+) \Gamma(\text{MOH}^+),$$

где $\Gamma(\cdot)$ — адсорбция соответствующего иона.

Представляло интерес выяснить, какие промежуточные частицы участвуют в растворении оксидов. При этом предполагалось, что на поверхности оксидов образуются частицы гидрокомплексов кобальта такого же состава, что и находящиеся в растворе. Для расчета их концентрации применяли системы уравнений: материального баланса по базовым компонентам реакции гидролиза (ионы водорода и кобальта); системы уравнений ступенчатого гидролиза (уравнений закона действующих масс) с учетом ступенчатых констант гидролиза [7, 11]. Согласно методу Хоугена — Ватсона, для установления связи между поверхностной и объемной концентрацией различных ионов кобальта и меди (II) предполагалось, что зависимость концентрации ионов на поверхности оксидов и в растворе подчиняется изотерме Ленгмюра.

Зависимость удельной скорости растворения оксидов кобальта и меди в разбавленной серной кислоте выражается следующими уравнениями:

$$W_i = W_0 \Gamma(\text{CoOH}^{2+}) \Gamma(\text{H}^+) = W_0 \left(\frac{[\text{CoOH}^{2+}]}{[\text{CoOH}^{2+}] + K_1} \right) \left(\frac{[\text{H}^+]}{[\text{H}^+] + K_2} \right);$$

$$W_i = W_0 \Gamma(\text{CuOH}^+) \Gamma(\text{H}^+) = W_0 \left(\frac{[\text{CuOH}^+]}{[\text{CuOH}^+] + K_1} \right) \left(\frac{[\text{H}^+]}{[\text{H}^+] + K_2} \right).$$

Выводы. На основе систематического изучения кинетики растворения оксидов кобальта и меди в растворах кислот показано, что необходимо учитывать влияние природы центров растворения оксидов на скорость процесса.

Проведен анализ кривых растворения ($\alpha-t$)-оксидов для расчета кинетических параметров (n_{H^+} , E_a). Наиболее оптимальной (по критерию Фишера) является модель Бартона — Странского с учетом фрактальной геометрии.

Установлено, что скорости растворения оксида кобальта и оксида меди сравнимы, хотя оксид кобальта Co_3O_4 растворяется чуть быстрее оксида меди CuO в серной кислоте H_2SO_4 .

Для описания процессов растворения оксидов кобальта и меди лучше использовать метод Хоугена — Ватсона.

ЛИТЕРАТУРА

1. Alan T. Stone, Hans-Jakob Ulrich. Kinetics and reaction stoichiometry in the reductive dissolution of manganese (IV) dioxide and Co (III) oxide by hydroquinone // J. of Colloid and Interface Science. 1989. Vol. 132. No. 2. P. 509–522. DOI: 10.1016/0021-9797(89)90265-8 URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0021979789902658>
2. Diggle J.W. Oxides and oxide films. Vol. 2. New York: Marcel Dekker, 1973. 481 p.
3. Valverde N. Factors determining the rate of dissolution of metal oxides in acidic aqueous solutions // Ber. Bunsenges. Phys. Chem. 1988. Vol. 92. No. 10. P. 1072–1078. DOI: 10.1002/bbpc.198800275 URL: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/bbpc.198800275/full>
4. Valverde N. Investigations on the rate of dissolution of ternary oxide systems in acidic solutions // Ber. Bunsenges. Phys. Chem. 1977. Vol. 81. No. 4. P. 380–384. DOI: 10.1002/bbpc.19770810406 URL: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/bbpc.19770810406/full>
5. Valverde N. Considerations on the kinetics and the mechanism of the dissolution of metal oxides in acidic solutions // Ber. Bunsenges. Phys. Chem. 1976. Vol. 80. No. 4. P. 330–340. DOI: 10.1002/bbpc.19760800413 URL: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/bbpc.19760800413/full>
6. Seo M., Sato N. Dissolution of hydrous metal oxides in acid solutions // Boshoku Gijutsu. 1975. Vol. 24. P. 339–402. URL: https://www.jstage.jst.go.jp/article/jcorr1974/24/8/24_8_399/_pdf
7. Кинетика и механизмы растворения оксидно-медных фаз в растворах электролитов / И.Г. Горичев, А.Д. Изотов, А.М. Кутепов, Б.Е. Зайцев, В.В. Батраков, О.Н. Плахотная. М.: Изд-во РУДН, 2002. 210 с.
8. Батраков В.В., Горичев И.Г., Киприянов Н.А. Влияние двойного электрического слоя на кинетику растворения оксидов металлов // Электрохимия. 1994. Т. 30. № 4. С. 444–458.
9. Горичев И.Г., Киприянов Н.А. Кинетика растворения оксидных фаз в кислотах // Журн. физ. химии. 1981. Т. 55. № 11. С. 2734–2751.
10. Горичев И.Г., Киприянов Н.А. Кинетические закономерности процесса растворения оксидов металлов в кислых средах // Успехи химии. 1984. Т. 53. № 11. С. 1790–1825.
11. Марченко З. Фотометрическое определение элементов. М.: Мир, 1971. 501 с.

12. *Силикатные* анодные покрытия на алюминии, содержащие оксиды кобальта и/или меди и/или церия, и их активность в окислении СО / Л.М. Тырина, В.С. Руднев, И.В. Лукиянчук, А.Ю. Устинов, П.М. Недозоров, М.С. Васильева, Н.С. Каминский, В.В. Пермьяков // *Физико-химия поверхности и защита материалов*. 2015. Т. 51. № 5. С. 532–540.
13. *Виноградова Е.Н.* Исследование катализаторов на основе оксидов никеля, меди и кобальта в процессе окисления метана // *Успехи химии и химической технологии*. 2009. Т. 23. № 2. С. 43–47.
14. *Пятницкий И.В.* Аналитическая химия кобальта. М.: Наука, 1965. 259 с.
15. *Дельмон Б.* Кинетика гетерогенных реакций. М.: Мир, 1972. 555 с.
16. *Розовский А.Я.* Гетерогенные химические реакции. М.: Наука, 1980. 324 с.
17. *Барре П.* Кинетика гетерогенных процессов. М.: Мир, 1976. 399 с.
18. *Шмид Р., Сапунов В.И.* Неформальная кинетика в поисках путей химических реакций. М.: Мир, 1985. 264 с.
19. *Безденежных А.А.* Инженерные методы составления уравнений скоростей реакций и расчета кинетических констант. Л.: Химия, 1973. 256 с.
20. *Батлер Дж.* Ионные равновесия. Л.: Химия, 1973. 448 с.
21. *Моделирование* механизма влияния концентрации серной кислоты и рН на кинетику растворения оксида кобальта (II) и кобальта (III) / Е.А. Якушева, И.Г. Горичев, Т.К. Атанасян, Н.А. Кишкина, А.Д. Изотов // *Журнал неорганической химии*. 2005. Т. 50. № 12. С. 2090–2099.
22. *Якушева Е.А., Горичев И.Г., Атанасян Т.К.* Моделирование механизма влияния концентрации H_2SO_4 , HCl, ЭДТА и рН на кинетику растворения оксидов кобальта // XLIV Всеросс. конф. по проблемам математики, информатики, физики и химии. Тезисы докладов. 2008.
23. *Якушева Е.А., Горичев И.Г., Атанасян Т.К., Лайнер Ю.А.* Кинетика растворения оксидов кобальта в кислых средах // *Металлы*. 2010. № 2. С. 21–27.
24. *Якушева Е.А., Горичев И.Г., Атанасян Т.К., Изотов А.Д.* Изучение кинетики растворения оксидов кобальта (Co_3O_4 , Co_2O_3) при различных концентрациях H_2SO_4 , HCl, ЭДТА и рН // XIX Менделеевский съезд по общей и прикладной химии. Тезисы. Т. 3. Волгоград, 2011. С. 366–371.
25. *Якушева Е.А., Горичев И.Г., Атанасян Т.К., Лайнер Ю.А.* Кинетика растворения оксидов кобальта, никеля и железа в серной кислоте // *Металлы*. 2012. № 2. С. 35–40.
26. *Кинетика* и механизм растворения оксидно-медных фаз в кислых средах / И.Г. Горичев, В.В. Батраков, А.Д. Изотов, С.Б. Зайцев, О.Н. Плахотная. М.: РУДН, 2002. 210 с.
27. *Соколов И.В., Горичев И.Г., Изотов А.Д., Плахотная О.Н.* Влияние комплексонов на кинетику растворения оксида меди (II) в сернокислых растворах // Междунар. конф. по химической технологии ХТ'07. Тезисы докладов. М.: Изд-во Ленанд, 2007. С. 178–181.
28. *Горичев И.Г., Забенькина Е.О., Лайнер Ю.А., Плахотная О.Н.* Влияние рН на адсорбцию ионов меди (II) на оксидных сорбентах // *Химическая технология*. 2009. № 2. С. 98–105.

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

Горичев Игорь Георгиевич — д-р хим. наук, профессор кафедры общей химии Московского педагогического государственного университета (Российская Федерация, 119991, Москва, ул. Малая Пироговская, д. 1/1).

Атанасян Татьяна Климентьевна — канд. хим. наук, доцент кафедры общей химии Московского педагогического государственного университета (Российская Федерация, 119991, Москва, ул. Малая Пироговская, д. 1/1).

Плахотная Ольга Николаевна — канд. хим. наук, доцент кафедры аналитической, физической и коллоидной химии Первого Московского государственного медицинского университета им. И.М. Сеченова (Российская Федерация, 119991, Москва, ул. Трубецкая, д. 8, стр. 2).

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

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Якушева Е.А., Горичев И.Г., Атанасян Т.К., Плахотная О.Н., Горячева В.Н. Моделирование кинетических процессов растворения оксидов кобальта и меди в серной кислоте // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2017. № 3. С. 124–134.
DOI: 10.18698/1812-3368-2017-3-124-134

SIMULATION OF KINETIC PROCESSES OF COBALT AND COPPER OXIDES DISSOLUTION IN SULFURIC ACID

E.A. Yakusheva¹

el.yakusheva@yandex.ru

I.G. Gorichev²

T.K. Atanasyan²

O.N. Plakhotnaya³

V.N. Goryacheva¹

¹ Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

² Moscow State University of Education (MSPU), Moscow, Russian Federation

³ I.M. Sechenov First Moscow State Medical University (MSMU),

Moscow, Russian Federation

Abstract

The simulation of dissolution processes of oxides in acids showed that the limiting stage of the dissolution process is the transition of complexes of oxides formed on the surface into a solution. We developed a system analysis of the dissolution curves ($\alpha-t$)-oxides to calculate the kinetic parameters (n_{H^+} , E_a). Findings of the research show that Co_3O_4 oxide dissolves faster than copper oxide in H_2SO_4

Keywords

Cobalt and copper oxides, kinetics, dissolution, simulation, Barton — Stranskiy model, Hougen — Watson method

REFERENCES

- [1] Alan T. Stone, Hans-Jakob Ulrich. Kinetics and reaction stoichiometry in the reductive dissolution of manganese (IV) dioxide and Co (III) oxide by hydroquinone. *J. of Colloid and Interface Science*. 1989, vol. 132, no. 2, pp. 509–522. DOI: 10.1016/0021-9797(89)90265-8 Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0021979789902658>
- [2] Diggle J.W. Oxides and oxide films. Vol. 2. New York, Marcel Dekker, 1973. 481 p.
- [3] Valverde N. Factors determining the rate of dissolution of metal oxides in acidic aqueous solutions. *Ber. Bunsenges. Phys. Chem.*, 1988, vol. 92, no. 10, pp. 1072–1078. DOI: 10.1002/bbpc.198800275 Available at: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/bbpc.198800275/full>
- [4] Valverde N. Investigations on the rate of dissolution of ternary oxide systems in acidic solutions. *Ber. Bunsenges. Phys. Chem.*, 1977, vol. 81, no. 4, pp. 380–384. DOI: 10.1002/bbpc.19770810406 Available at: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/bbpc.19770810406/full>
- [5] Valverde N. Considerations on the kinetics and the mechanism of the dissolution of metal oxides in acidic solutions. *Ber. Bunsenges. Phys. Chem.*, 1976, vol. 80, no. 4, pp. 330–340. DOI: 10.1002/bbpc.19760800413 Available at: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/bbpc.19760800413/full>
- [6] Seo M., Sato N. Dissolution of hydrous metal oxides in acid solutions. *Boshoku Gijutsu*, 1975, vol. 24, pp. 339–402. Available at: https://www.jstage.jst.go.jp/article/jcorr1974/24/8/24_8_399/_pdf
- [7] Gorichev I.G., Izotov A.D., Kutepov A.M., Zaytsev B.E., Batrakov V.V., Plakhotnaya O.N. Kinetika i mekhanizmy rastvoreniya oksidno-mednykh faz v rastvorakh elektrolitov [Kinetics and dissolution mechanism of oxide-copper phases in electrolytic solutions]. Moscow, RUDN Publ., 2002. 210 p.
- [8] Batrakov V.V., Gorichev I.G., Kipriyanov N.A. Impact of double electric layer on kinetics of metal oxides dissolution. *Elektrokhimiya*, 1994, vol. 30, no. 4, pp. 444–458 (in Russ.).
- [9] Gorichev I.G., Kipriyanov N.A. Kinetics of oxide phases dissolution in acids. *Zhurn. fiz. khimii*, 1981, vol. 55, no. 11, pp. 2734–2751 (in Russ.).
- [10] Gorichev I.G., Kipriyanov N.A. Regular kinetic features of the dissolution of metal oxides in acidic media. *Russian Chemical Reviews*, vol. 53, no. 11, 1984, pp. 1039.
- [11] Marchenko Z. Fotometricheskoe opredelenie elementov [Photometric definition of elements]. Moscow, Mir Publ., 1971. 501 p.
- [12] Tyrina L.M., Rudnev V.S., Lukiyanchuk I.V., Ustinov A.Yu., Nedozorov P.M., Vasilyeva M.S., Kaminskii N.S., Permyakov V.V. Silicate anodic coatings on aluminum containing oxides of cobalt and/or copper and/or cerium and their activity in CO oxidation. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, 2015, vol. 51, no. 5, pp. 821–828. DOI: 10.1134/S207020511505024X Available at: <http://link.springer.com/article/10.1134/S207020511505024X>
- [13] Vinogradova E.N. Research on accelerants based on oxides of nickel, copper and cobalt in process of methane oxidation. *Uspekhi khimii i khimicheskoy tekhnologii* [Advances in Chemistry and Chemical Technology], 2009, vol. 23, no. 2, pp. 43–47 (in Russ.).

- [14] Pyatnitskiy I.V. Analiticheskaya khimiya kobal'ta [Analytical chemistry of cobalt]. Moscow, Nauka Publ., 1965. 259 p.
- [15] Del'mon B. Kinetika geterogennykh reaktsiy [Heterogeneous reaction kinetics]. Moscow, Mir Publ., 1972. 555 p.
- [16] Rozovskiy A.Ya. Geterogennye khimicheskie reaktsii [Heterogeneous chemical reactions]. Moscow, Nauka Publ., 1980. 324 p.
- [17] Barret P. Cinétique hétérogène. Paris, Gauthier-Villars et Fils, 1973. 574 p.
- [18] Shmid R., Sapunov B.I. Neformal'naya kinetika v poiskakh putey khimicheskikh reaktsiy [Informal kinetics in search of the ways for chemical reactions]. Moscow, Mir Publ., 1985. 264 p.
- [19] Bezdenezhnykh A.A. Inzhenernye metody sostavleniya uravneniy skorostey reaktsiy i rascheta kineticheskikh konstant [Engineering approach of equation generation for reaction speed and kinetic constants calculation]. Leningrad, Khimiya Publ., 1973. 256 p.
- [20] Butler J.N. Ionic equilibrium: A mathematical approach. Addison-Wesley Educational Publishers Inc., 1964.
- [21] Yakusheva E.A., Gorichev I.G., Atanasyan T.K., Kishkina N.A., Izotov A.D. Modeling of the influence of the sulfuric acid concentration and pH on the dissolution kinetics of cobalt (II, III) oxide. *Russian Journal of Inorganic Chemistry*, 2005, vol. 50, no. 12, pp. 1964–1973.
- [22] Yakusheva E.A., Gorichev I.G., Atanasyan T.K. Simulation of impact mechanism of concentration of H₂SO₄, HCl, EDTA and pH on kinetics of cobalt oxides dissolution. *XLIV Vseross. konf. po problemam matematiki, informatiki, fiziki i khimii. Tezisy dokladov* [XLIV Russ. conf. on problems of mathematics, informatics, physics and chemistry. Abstracts]. 2008.
- [23] Yakusheva E.A., Gorichev I.G., Atanasyan T.K., Layner Yu.A. Kinetics of dissolution of cobalt oxides in acidic media. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2010, vol. 2010, no. 1, pp. 18–23. DOI: 10.1134/S0036029510010040
Available at: <http://link.springer.com/article/10.1134/S0036029510010040>
- [24] Yakusheva E.A., Gorichev I.G., Atanasyan T.K., Izotov A.D. Study of cobalt oxides (Co₃O₄, Co₂O₃) dissolution kinetics in case of different concentrations of H₂SO₄, HCl, EDTA and pH. *XIX Mendeleevskiy s'ezd po obshchey i prikladnoy khimii. Tezisy. T. 3* [XIX Mendeleev conf. on general and applied chemistry. Abstracts. Vol. 3]. Volgograd, 2011, pp. 366–371 (in Russ.).
- [25] Yakusheva E.A., Gorichev I.G., Atanasyan T.K., Layner Yu.A. Kinetics of the dissolution of cobalt, nickel, and iron oxides in sulfuric acid. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2012, vol. 2012, no. 3, pp. 198–202. DOI: 10.1134/S0036029512030160
Available at: <http://link.springer.com/article/10.1134/S0036029512030160>
- [26] Gorichev I.G., Batrakov V.V., Izotov A.D., Zaytsev S.B., Plakhotnaya O.N. Kinetika i mekhanizm rastvoreniya oksidno-mednykh faz v kislykh sredakh [Kinetics and dissolution mechanism of oxide-copper phases in acidic mediums]. Moscow, RUDN Publ., 2002. 210 p.
- [27] Sokolov I.V., Gorichev I.G., Izotov A.D., Plakhotnaya O.N. Chelate impact on kinetics of copper oxide (II) dissolution in acidic solutions. *Mezhdunar. konf. po khimicheskoy tekhnologii KhT'07. Tezisy dokladov* [Int. conf. on chemical technology KhT'07. Abstracts]. Moscow, Lenand Publ., 2007, pp. 178–181 (in Russ.).
- [28] Gorichev I.G., Zaben'kina E.O., Layner Yu.A., Plakhotnaya O.N. Impact of pH on ionic copper (II) absorption in oxide sorbents. *Khimicheskaya tekhnologiya*, 2009, no. 2, pp. 98–105 (in Russ.).

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

Gorichev I.G. — Dr. Sc. (Chem.), Professor of Chair of General Chemistry, Moscow State University of Education (MSPU) (Malaya Pirogovskaya ul. 1/1, Moscow, 119991 Russian Federation).

Atanasyan T.K. — Cand. Sc. (Chem.), Assoc. Professor of Chair of General Chemistry, Moscow State University of Education (MSPU) (Malaya Pirogovskaya ul. 1/1, Moscow, 119991 Russian Federation).

Plakhotnaya O.N. — Cand. Sc. (Chem.), Assoc. Professor of Chair of Analytical, Physical and Colloid Chemistry, I.M. Sechenov First Moscow State Medical University (MSMU) (Trubetskaya ul. 8, str. 2, Moscow, 119991 Russian Federation).

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

Please cite this article in English as:

Yakusheva E.A., Gorichev I.G., Atanasyan T.K., Plakhotnaya O.N., Goryacheva V.N. Simulation of Kinetic Processes of Cobalt and Copper Oxides Dissolution in Sulfuric Acid. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Estestv. Nauki* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Nat. Sci.], 2017, no. 3, pp. 124–134.

DOI: 10.18698/1812-3368-2017-3-124-134



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана
вышло в свет учебное пособие авторов

А.В. Чашкина, Д.А. Жукова

**«Элементы конечной алгебры: группы,
кольца, поля, линейные пространства»**

Рассмотрены основные алгебраические структуры и их свойства. Все утверждения снабжены подробными доказательствами и проиллюстрированы большим числом примеров. Основное внимание уделено конечным полям и линейным пространствам над конечными полями.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

+7 (499) 263-60-45

press@bmstu.ru

www.baumanpress.ru