

## МОДЕЛИРОВАНИЕ КИНЕТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ РАСТВОРЕНИЯ ОКСИДОВ КОБАЛЬТА И МЕДИ В СЕРНОЙ КИСЛОТЕ

Е.А. Якушева<sup>1</sup>

e.yakusheva@yandex.ru

И.Г. Горичев<sup>2</sup>

Т.К. Атанасян<sup>1</sup>

О.Н. Плахотная<sup>3</sup>

В.Н. Горячева<sup>1</sup>

<sup>1</sup> МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

<sup>2</sup> Московский педагогический государственный университет,

Москва, Российская Федерация

<sup>3</sup> 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].

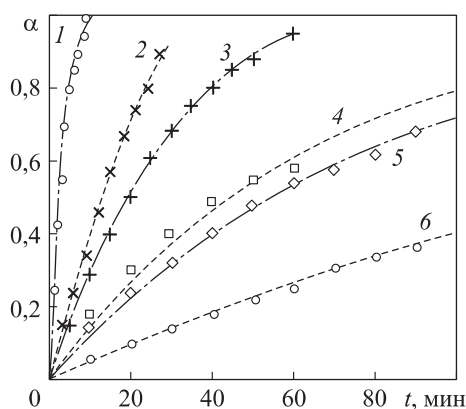
**Цель настоящей работы** — изучить кинетику растворения оксидов кобальта  $\text{Co}_3\text{O}_4$  и меди  $\text{CuO}$  в растворе серной кислоты  $\text{H}_2\text{SO}_4$  различной концентрации, провести моделирование процессов растворения оксидов с позиций гетерогенной кинетики.

**Методика изучения кинетических закономерностей растворения оксидов кобальта и меди в серной кислоте.** Для кинетических исследований выделялись фракции оксидов  $\text{Co}_3\text{O}_4$  и  $\text{CuO}$  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.

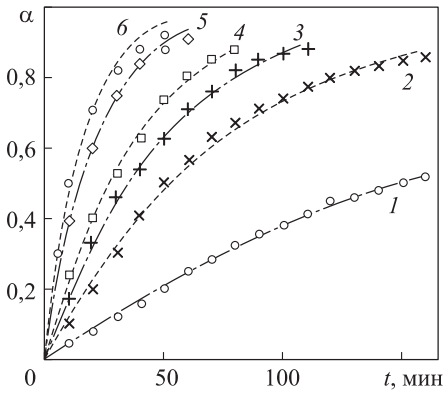
Навеска оксидов массой 0,3 г вводилась в термостатируемый реактор, содержащий 0,5 л водного раствора серной кислоты заданной концентрации. Растворение оксидов проходило при непрерывном перемешивании с постоянной скоростью  $800 \text{ мин}^{-1}$  при различных значениях температуры (298...343 К). Концентрацию 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  $\alpha$ – $t$  на рис. 1 и рис. 2. Значения величины  $\alpha$  рассчитаны по урав-

**Рис. 1.** Зависимость доли растворенного оксида кобальта  $\text{Co}_3\text{O}_4$  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  $\alpha$  — доля растворенного оксида;  $D_t$ ,  $D_\infty$  — оптические плотности фильтрата в моменты времени  $t$  и  $t = \infty$ , когда происходит полное растворение оксида [22–30].

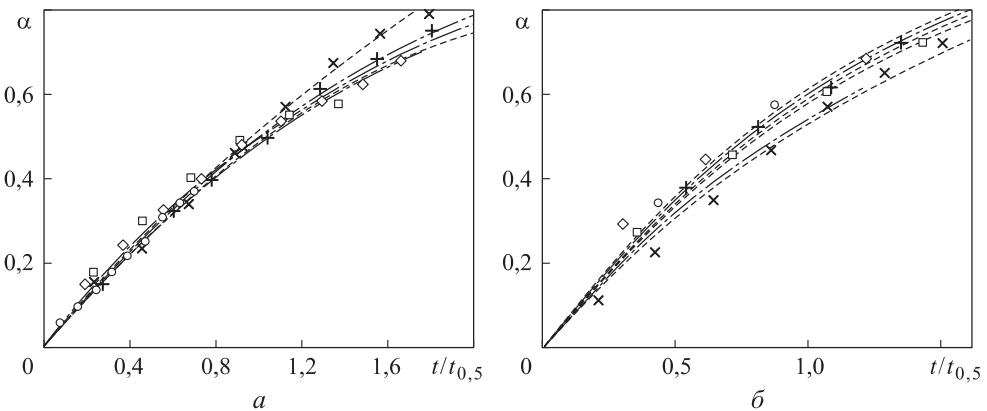


**Рис. 2.** Зависимость доли растворенного оксида меди  $\text{CuO}$  от времени ( $T = 293 \text{ K}$ ,  $\text{pH} = 2,05$ ) при значениях концентрации серной кислоты 0,25 (1), 0,5 (2), 1,0 (3), 2,5 (4), 5,0 (5), 7,5 (6) (точки — экспериментальные данные, линии — расчетные значения, полученные по уравнению (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  $\sigma$ -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  $n_{\text{H}^+}$  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  $\text{Co}_3\text{O}_4$  (а) и оксида меди  $\text{CuO}$  (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  $\text{Co}_3\text{O}_4$  растворяется чуть быстрее, чем оксид меди  $\text{CuO}$  (рис. 4). Порядок реакции по серной кислоте совпадает для двух оксидов ( $\text{CuO}$ ,  $\text{Co}_3\text{O}_4$ ) и равен 0,5.

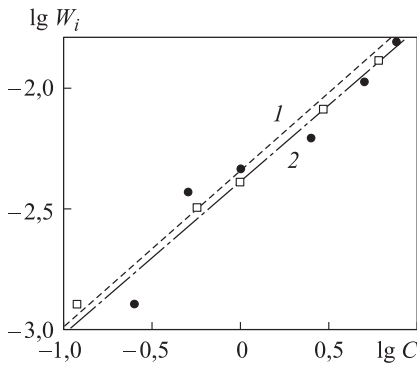
#### Значения удельной скорости растворения оксидов $\text{Co}_3\text{O}_4$ , $\text{CuO}$ в зависимости от концентрации $\text{H}_2\text{SO}_4$

$[\text{H}_2\text{SO}_4]$ , моль/л	$\lg W_i$	$[\text{H}_2\text{SO}_4]$ , моль/л	$\lg W_i$
$\text{Co}_3\text{O}_4$		$\text{CuO}$	
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  $\text{Co}_3\text{O}_4$ ,  $\text{CuO}$  от концентрации  $\text{H}_2\text{SO}_4$  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  $\text{Co}_3\text{O}_4$  (1) и меди  $\text{CuO}$  (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  $\text{H}^+$  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](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. Лукианчук, 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. Yakusheva<sup>1</sup>

el.yakusheva@yandex.ru

I.G. Gorichev<sup>2</sup>

T.K. Atanasyan<sup>2</sup>

O.N. Plakhotnaya<sup>3</sup>

V.N. Goryacheva<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

<sup>2</sup> Moscow State University of Education (MSPU), Moscow, Russian Federation

<sup>3</sup> 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](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 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 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 (Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, Co<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) dissolution kinetics in case of different concentrations of H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 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