

## КИНЕТИКА РАСТВОРЕНИЯ ТРИОКСИДА МОЛИБДЕНА В ЩЕЛОЧНОЙ СРЕДЕ

Е.А. Елисеева<sup>1</sup>

yakusheva@bmstu.ru

С.Л. Березина<sup>1</sup>

sberezina@bmstu.ru

И.Г. Горичев<sup>2</sup>

gorichevig@gmail.com

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

<sup>2</sup> МПГУ, Москва, Российская Федерация

---

### Аннотация

Приведены результаты экспериментального изучения кинетики растворения порошкообразных образцов  $\text{MoO}_3$  в водном аммиачном растворе при различных концентрациях и значениях pH. Концентрация ионов молибдена в пробах фильтрата определена спектрофотометрически. Получены кинетические характеристики, рассчитаны кинетические параметры (удельная скорость растворения, порядок реакции по иону  $\text{H}^+$ ). Установлено, что в интервале концентраций аммиачного раствора 0,02... 1,26 моль/л скорость растворения увеличивается, а с ростом pH проходит через максимум. С учетом констант кислотно-основных равновесий проведено моделирование процесса растворения, установлен его стадийный характер. Дробный порядок реакции по ионам  $\text{H}^+$ , рассчитанный по кривым, которые построены в координатах  $\alpha-t/t_{0,5}$  (метод аффинных преобразований), указывает на адсорбционный механизм растворения. Показано, что растворение  $\text{MoO}_3$  протекает с образованием промежуточных адсорбционных комплексов. Вследствие малой концентрации  $\text{HMoO}_4^-$  при растворении  $\text{MoO}_3$  в изученном интервале pH поверхностно-активной частицей, на которой адсорбируются группы ионов, можно считать  $\text{MoO}_4^{2-}$ . Полученные результаты являются дополнением к имеющимся данным по закономерностям поведения оксидных фаз молибдена и других переходных металлов и могут быть использованы в практических приложениях, связанных с растворением молибдена в щелочных электролитах

### Ключевые слова

*Кинетические кривые, триоксид молибдена, комплексные соединения, порядок реакции, моделирование процесса, механизм растворения*

Поступила 19.07.2022

Принята 17.10.2022

© Автор(ы), 2023

**Введение.** Уникальные свойства молибдена (тугоплавкость, невысокая плотность, малое сечение захвата тепловых нейтронов) определяют его широкое использование в различных областях, что сопровождается сокращением запасов молибденовых руд и их обеднением. Молибден применяют при производстве жаропрочных, коррозионно-стойких, инструментальных и конструкционных сталей для авиастроения, при изготовлении оборудования, эксплуатируемого при высоких значениях рабочей температуры, в качестве материала для ядерных реакторов. Изучение закономерностей растворения оксидов молибдена актуально при решении задач оптимизации технологий травления, выщелачивания и обогащения молибденсодержащих руд, регенерации оксидов молибдена из отработанных катализаторов, разработке эффективных методов защиты от коррозии оборудования и установлении оптимальных режимов электрохимической размерной обработки молибденовых сплавов.

Молибдаты аммония и натрия являются компонентами сложных систем, образующихся в технологических процессах переработки молибденсодержащих руд [1]. К важным аспектам исследования относится влияние коррозионной среды (состава, концентрации, pH) на кинетику растворения оксидов молибдена. При имеющемся числе публикаций и применении различных моделей растворения вопрос не является в достаточной степени изученным и сравнительно согласованным.

*Цель работы* — изучение кинетики растворения порошкового оксида  $\text{MoO}_3$  в водных аммиачных растворах при различных концентрациях аммиака и значениях pH, расчет кинетических параметров и моделирование процесса растворения.

**Материалы и методы исследования.** Для проведения кинетических исследований использовали порошкообразные образцы оксида молибдена  $\text{MoO}_3$  промышленного производства (ТУ 6-09-4471-77) с удельной поверхностью  $100 \pm 10 \text{ м}^2/\text{г}$ , соответствующей радиусу частиц оксида 8...10 мкм. Навеска  $\text{MoO}_3$  массой 1 г помещалась в термостатируемый реактор, содержащий 1 л водного раствора аммиака. Используются аммиачные растворы в интервале значений концентрации 0,02...1,26 моль/л и pH = 8–11. Растворение оксида проводили при перемешивании смеси магнитной мешалкой со скоростью  $800 \text{ мин}^{-1}$  для исключения диффузионных затруднений. Опыты проводили при  $T = 303 \text{ К}$ . Через определенные промежутки времени стеклянным шоттовским фильтром периодически отбирали пробы раствора. Концентрацию молибдена в пробах фильтрата определяли спектрофотометрически при длине волны 400 нм с образованием окрашенного ро-

данидного комплекса  $\text{Mo}(\text{SCN})_5$  [2]. Экспериментальные данные обрабатывались методом регрессионного анализа с использованием Mathcad.

**Результаты исследования и их обсуждение.** Общепринятые модели выщелачивания или полного растворения частиц порошкообразных оксидов металлов основаны на адсорбционных явлениях и влиянии специфической поверхностной адсорбции компонентов. Растворение оксидов происходит на поверхностных дефектах кристаллической решетки, активных центрах растворения, адсорбирующих образующиеся заряженные частицы [3, 4].

Если скорости растворения и образования активных центров соизмеримы, то анализ кинетических данных можно проводить с использованием представлений формальной кинетики [5]. При выборе кинетических уравнений критерием является сравнительная согласованность экспериментальных данных с графическими, полученными путем моделирования процесса [6–9].

При сравнительном согласовании данных нельзя исключать влияние на кинетические характеристики начального состояния поверхности твердой фазы (состава, структуры), характера отклонения состава от стехиометрии и методики приготовления опытных образцов [10].

Удельная скорость растворения оксида определяется из уравнения

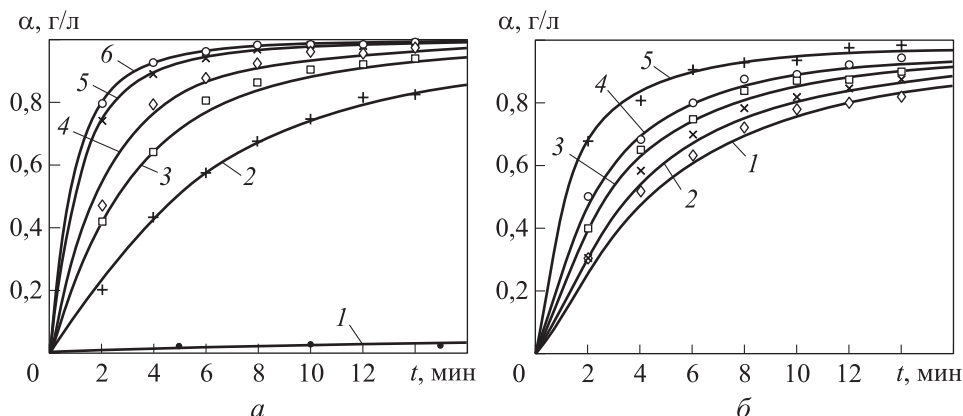
$$W : \partial\alpha / \partial t = Wf(\alpha),$$

где  $f(\alpha)$  — функция, учитывающая изменение поверхностного состояния оксида во времени.

Долю растворенного оксида рассчитывали как  $\alpha = D / D_\infty$ , где  $D$ ,  $D_\infty$  — оптическая плотность фильтрата при отборе пробы в определенное время и по времени прекращения растворения навески.

Экспериментальные кривые (рис. 1), построенные в координатах  $\alpha$ – $t$ , имеют  $\sigma$ -образный вид.

Согласно данным на рис. 1, а, с повышением концентрации аммиака доля растворенного оксида возрастает, что в соответствии с моделью Бартона — Странского [11] объясняется увеличением числа поверхностных активных центров, их иницированием и разветвлением. Начальное возрастание скорости растворения оксида обусловлено формированием поверхностного фронта растворения. Дальнейшее активное растворение  $\text{MoO}_3$  связано с расширением границы фронта растворения, прониканием ее в твердую фазу и вовлечением в процесс всей поверхности до установления равновесного состояния. Скорость процесса проходит через максимум (рис. 1, б), наблюдаемый при  $\text{pH} = 9,5$ .



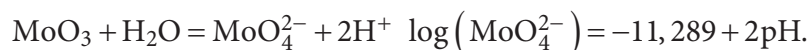
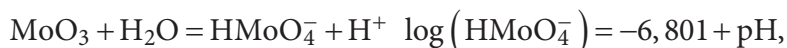
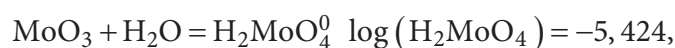
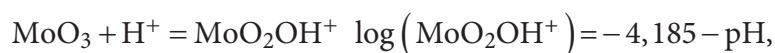
**Рис. 1.** Зависимости доли растворенного оксида  $\text{MoO}_3$  от времени:

*a* — при  $T = 303 \text{ K}$ ,  $\text{pH} = 10,04$  и концентрации аммиака 0 (1), 0,02 (2), 0,07 (3), 0,12 (4), 0,6 (5) и 1,26 моль/л (6); *б* — при  $T = 303 \text{ K}$ ,  $C_{\text{NH}_3} = 0,12$  моль/л, при  $\text{pH} = 8$  (1), 10,45 (2), 10,25 (3), 10,04 (4) и 9,6 (5)

Исходя из поверхностной концентрации адсорбированных веществ и теории активных центров, рассчитана зависимость удельной скорости растворения от  $\text{pH}$  и концентрации раствора. Согласно представлениям метода Хоугена — Ватсона [12], процесс растворения происходит на центрах оксидов, адсорбирующих образующиеся ионные пары и ионы.

Для расчета удельной скорости растворения оксида построены кинетические кривые в координатах  $\alpha - t/t_{0,5}$  (метод аффинных преобразований). Дробный порядок реакции по ионам  $\text{H}^+$  рассчитан по кривым зависимости  $\alpha$  от приведенного времени  $t/t_{0,5}$  и приближенно равен 0,5, что указывает на адсорбционный механизм растворения.

В водных растворах без учета образования полиядерных ионных форм молибдена возможно образование частиц, степень участия которых в растворимости оксида определяется значениями  $\text{pH}$  [13]:



При определении характера зависимости  $W$ – $\text{pH}$  учитывалось установившееся при растворении адсорбционное равновесие частиц:



Исходя из предположения, что удельная скорость растворения в щелочной области определяется концентрацией активных центров  $[-\text{MoO}_4^-] \equiv [\text{HMoO}_4^-]$ , на поверхности которых адсорбируются ионы  $\text{NH}_4^+$ , при моделировании процесса с использованием модели Хоугена — Ватсона скорость растворения оксида описывается уравнением

$$W = W^0 \Gamma [\text{HMoO}_4^-] \Gamma [\text{NH}_4^+].$$

Здесь

$$\Gamma [\text{HMoO}_4^-] = C_{\text{Mo(VI)}} \frac{K_1}{K_1 + [\text{H}^+]}; \quad \Gamma [\text{NH}_4^+] = C_{\text{NH}_3} \frac{[\text{H}^+]}{K_2 + [\text{H}^+]}$$

— концентрации адсорбированных ионов на поверхности оксида, связанные с их объемной концентрацией,  $C_{\text{NH}_3} = [\text{NH}_3] + [\text{NH}_4^+]$  — суммарная концентрация аммиака.

В соответствии с уравнением адсорбции Ленгмюра удельная скорость растворения определяется как

$$W = W_1^0 \left( \frac{K_1}{K_1 + [\text{H}^+]} \right) \left( \frac{[\text{H}^+]}{K_2 + [\text{H}^+]} \right),$$

где  $K_1 = 10^{-9,5}$  моль/л,  $K_2 = 10^{-9}$  моль/л — константы равновесия в уравнении Ленгмюра;  $[\text{H}^+]$  — концентрация ионов водорода в растворе.

С использованием положений химической кинетики [14, 15] математическая зависимость  $W(C_{\text{NH}_3})$  в первом приближении описывается эмпирическим уравнением

$$W_i = W_{\text{max}} \frac{C_{\text{NH}_3}}{K_a + C_{\text{NH}_3}}.$$

Здесь  $K_a$  — константа кислотной диссоциации ионов  $\text{NH}_4^+$ .

Зависимость скорости растворения оксида от концентрации аммиака (рис. 2) имеет форму гиперболы; зависимость стремится к установившемуся постоянному значению  $W_{\text{max}}$ .

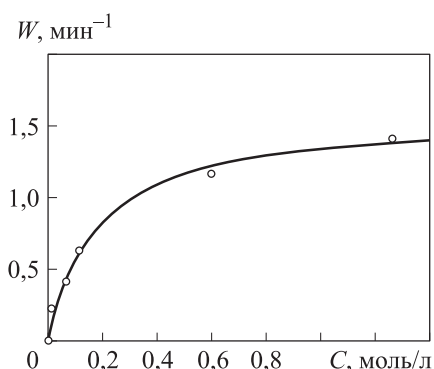
Значения скорости растворения  $\text{MoO}_3$  в зависимости от концентрации аммиака при  $T = 303$  К ( $\text{pH} = 10,04$ ,  $C_{\text{NH}_3} = 0,12$  моль/л) приведены ниже:

$C_{\text{NH}_3}$ , моль/л .....	1,26	0,6	0,12	0,07	0,02
$W$ , мин <sup>-1</sup> .....	0,34	1,25	0,67	0,54	0,41

Значения скорости растворения  $\text{MoO}_3$  в зависимости от pH раствора:

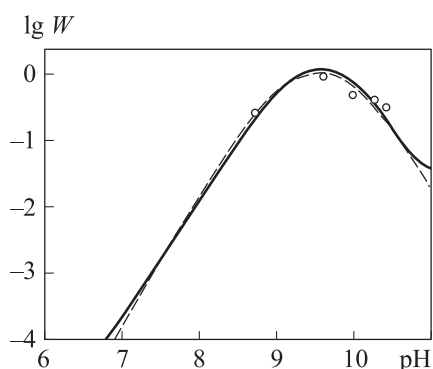
pH .....	8,70	9,60	10,04	10,27	10,44
$W$ , мин <sup>-1</sup> .....	1,42	1,17	0,63	0,42	0,23
lg $W$ .....	-0,47	0,09	-0,17	-0,27	-0,39

**Рис. 2.** Экспериментальная (o) и эмпирическая по корреляционному уравнению (—) зависимости удельной скорости растворения  $\text{MoO}_3$  от концентрации аммиака ( $T = 303 \text{ K}$ ,  $\text{pH} = 10,04$ )



Для определения участия частиц  $\text{NH}_3$  или  $\text{NH}_4^+$  в стадии, лимитирующей процесс растворения, исследовано влияние pH на удельную скорость растворения оксида при постоянной концентрации аммиака, которая поддерживалась путем изменения соотношения частиц  $\text{NH}_3$  и  $\text{NH}_4^+$  в растворе.

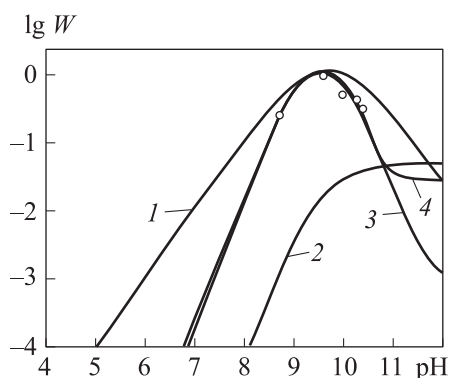
Зависимость логарифма удельной скорости растворения оксида от pH раствора (рис. 3) показывает, что скорость процесса максимальна при  $\text{pH} = 9,5 \pm 0,2$ .



**Рис. 3.** Экспериментальная (o) и регрессионная (—, --) зависимости логарифма удельной скорости растворения  $\text{MoO}_3$  от pH раствора ( $T = 303 \text{ K}$ ,  $C_{\text{NH}_3} = 0,12 \text{ моль/л}$ )

Моделирование зависимости удельной скорости растворения оксида молибдена от pH раствора при оценке характера поверхностных соединений проводят с использованием вероятностных подходов [16–20].

Наиболее приближена к объяснению влияния концентрации ионов аммония на удельную скорость растворения кривая 1 на рис. 4. Возрастание скорости растворения с повышением рН до 9,5 связано с увеличением числа активных центров, которым соответствует усиление адсорбции ионов. При  $\text{pH} > 9,5$  концентрация ионов  $\text{NH}_4^+$  в растворе и на поверхности оксида уменьшается, что снижает удельную скорость растворения.

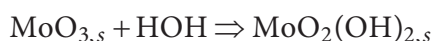


**Рис. 4.** Зависимость логарифма удельной скорости растворения  $\text{MoO}_3$  от рН ( $T = 303 \text{ K}$ ,  $C_{\text{NH}_3} = 1,26 \text{ моль/л}$ ) с учетом адсорбции ионов аммония на активных центрах (1), гидроксогрупп (2), ионов аммония и гидроксогрупп на активных центрах  $\text{HMoO}_4^-$  (3), ионов аммония и гидроксогрупп на активных центрах  $\text{MoO}_4^{2-}$  (4)

Концентрация  $\text{HMoO}_4^-$  в изученном интервале значений рН мала, поэтому поверхностно-активной частицей при растворении  $\text{MoO}_3$ , на которой адсорбируются группы ионов, можно считать  $\text{MoO}_4^{2-}$ .

Суммарный процесс растворения  $\text{MoO}_3 + 2\text{OH}^- \rightarrow \text{MoO}_4^{2-} + \text{H}_2\text{O}$  включает в себя:

– гидратацию поверхности оксида



– установление кислотно-основного равновесия (по данным потенциометрического титрования [17]):



– совместную адсорбцию ионов  $\text{NH}_4^+$  и  $\text{OH}^-$  на кислотно-основных центрах с образованием промежуточного соединения  $\text{MoO}_4^{2-} : \text{MoO}_4^{2-} : \text{NH}_4^+ \therefore \text{MoO}_4^{2-} \therefore \text{NH}_3$  и с последующим переходом комплексного иона в раствор (подтверждено адсорбционными измерениями и ИК-спектроскопией [21]).

**Выводы.** Получены экспериментальные зависимости удельной скорости растворения порошкообразного оксида  $\text{MoO}_3$  в водных растворах аммиака.



Установлено, что с повышением концентрации аммиака в интервале значений концентрации аммиачного раствора 0,02...1,26 моль/л удельная скорость растворения увеличивается; с ростом рН проходит через максимум (при рН = 9,5).

Рассчитаны значения кинетических параметров процесса (удельная скорость растворения, порядок реакции по иону  $H^+$ ).

Моделированием процесса с использованием данных о константах кислотно-основных равновесий предложена схема растворения  $MoO_3$ , протекающего с образованием промежуточных адсорбционных комплексов.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Хантургаева Г.И. Комбинированные технологии комплексной переработки труднообогатимых молибденовых и вольфрамовых руд. *ГИАБ*, 2009, № S14, с. 478–494.
- [2] Марченко З. Методы спектрофотометрии в УФ и видимой областях в неорганическом анализе. М., Бином. Лаборатория знаний, 2007.
- [3] 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.
- [4] Blesa M.A., Weisz A.D., Morando P.J., et al. The interaction of metal oxide surfaces with complexing agents dissolved in water. *Coord. Chem. Rev.*, 2000, vol. 196, iss. 1, pp. 31–63. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0010-8545\(99\)00005-3](https://doi.org/10.1016/S0010-8545(99)00005-3)
- [5] Безденежных А.А. Инженерные методы составления уравнений скоростей реакций и расчета кинетических констант. Л., Химия, 1973.
- [6] Rahnemaie R. Ion adsorption modeling as a tool to characterize metal (hydro)oxide behavior in soil. PhD thesis. Wageningen Univ., 2005.
- [7] Blesa M.A. Chemical dissolution of metal oxides. CRC Press, 2018.
- [8] Marin G.B., Yablonsky G.S., Constales D. Kinetics of chemical reactions. Wiley, 2011.
- [9] Yablonsky G.S., Constales D., Shekhtman S.O., et al. The Y-procedure: how to extract the chemical transformation rate from reaction-diffusion data with no assumption on the kinetic model. *Chem. Eng. Sci.*, 2007, vol. 62, iss. 23, pp. 6754–6767. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2007.04.050>
- [10] Елисеева Е.А., Березина С.Л., Болдырев В.С. и др. Влияние морфологии частиц  $Co_2O_3$  на кинетику растворения в электролитах. *Цветные металлы*, 2020, № 11, с. 14–18.
- [11] Елисеева Е.А., Березина С.Л., Болдырев В.С. и др. Моделирование процесса растворения оксида железа  $Fe_3O_4$  в кислотной среде. *Черные металлы*, 2020, № 10, с. 15–20.



- [12] Ferraris G.B., Donating G. A powerful method for Hougen — Watson model parameter estimation with integral conversion data. *Chem. Eng. Sci.*, 1974, vol. 29, iss. 6, pp. 1504–1509. DOI: [https://doi.org/10.1016/0009-2509\(74\)80177-6](https://doi.org/10.1016/0009-2509(74)80177-6)
- [13] Латимер В.М. Окислительные состояния элементов и их потенциалы в водных растворах. М., ИИЛ, 1954.
- [14] Степанов Н.Ф., Ерлыкина М.Е., Филиппов Г.Г. Методы линейной алгебры в физической химии. М., Изд-во МГУ, 1976.
- [15] Шмид Р., Сапунов В.П. Неформальная кинетика в поисках путей химических реакций. М., Мир, 1985.
- [16] Браун М., Доллимор Д., Галвей А. Реакции твердых тел. М., Мир, 1983.
- [17] Янг Д. Кинетика разложения твердых веществ. М., Мир, 1969.
- [18] Барре П. Кинетика гетерогенных процессов. М., Мир, 1976.
- [19] Розовский А.Я. Гетерогенные химические реакции. М., Наука, 1980.
- [20] Горичев И.Г., Ашхаруа Ф.Г., Вайнман С.К. О применимости топохимической модели растворения некоторых оксидов в кислотах. *Журн. физ. химии*, 1976, т. 50, № 6, с. 1610–1612.
- [21] Петроченков В.А., Горичев И.Г., Батраков В.В. и др. Каталитическое влияние аммиака на кинетику и механизм растворения  $\text{MoO}_3$  в щелочных растворах. *Теоретические основы химической технологии*, 2004, т. 38, № 4, с. 411–418.

**Елисеева 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).

**Березина Светлана Львовна** — канд. техн. 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 МПГУ (Российская Федерация, 119991, Москва, ул. Малая Пироговская, д. 1, стр. 1).

**Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:**

Елисеева Е.А., Березина С.Л., Горичев И.Г. Кинетика растворения триоксида молибдена в щелочной среде. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2023, № 2 (107), с. 98–109.

DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2023-2-98-109>

## KINETICS OF MOLYBDENUM TRIOXIDE DISSOLUTION IN THE ALKALINE MEDIUM

E.A. Eliseeva<sup>1</sup>

S.L. Berezina<sup>1</sup>

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

yakusheva@bmstu.ru

sberezina@bmstu.ru

gorichevig@gmail.com

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

<sup>2</sup> Moscow Pedagogical State University, Moscow, Russian Federation

---

### Abstract

The paper presents experimental study results of the MoO<sub>3</sub> powder samples dissolution kinetics in the aqueous ammonia solution at various pH concentrations and values. Molybdenum ions concentration in the filtrate samples was determined spectrophotometrically. Kinetic characteristics were obtained, and kinetic parameters (specific dissolution rate, reaction order with respect to the H<sup>+</sup> ion) were calculated. It was established that the dissolution rate was increasing in the ammonia solution concentration range of 0.02–1.26 mol/l, and with the growing pH it passed through the maximum. Taking into account the acid-base equilibria constants, the dissolution process was simulated, and its stage-by-stage nature was established. Fractional reaction order with respect to the H<sup>+</sup> ions calculated from the curves plotted in the  $\alpha-t/t_{0.5}$  coordinates (affine transformation method) indicated the adsorption mechanism of dissolution. It was shown that the MoO<sub>3</sub> dissolution proceeded with formation of the intermediate adsorption complexes. Due to the HMoO<sub>4</sub><sup>-</sup> low concentration in the MoO<sub>3</sub> concentration within the studied pH range by the surface-active particle, on which groups of ions were adsorbed, the MoO<sub>4</sub><sup>2-</sup> could be considered. The results obtained are an addition to the data possessed on the molybdenum oxide phase and other transitional metals behavior. They could be applied in the practical applications associated with dissolving molybdenum in the alkaline electrolytes

### Keywords

*Kinetic curves, molybdenum oxide, complex compounds, reaction order, process modeling, dissolution mechanism*

Received 19.07.2022

Accepted 17.10.2022

© Author(s), 2023

---

### REFERENCES

- [1] Khanturgaeva G.I. Combined technologies for complex processing of refractory molybdenum and tungsten ores. *GIAB* [Mining Information and Analytical Bulletin], 2009, no. S14, pp. 478–494 (in Russ.).

- [2] Marczenko Z. Spectrofotometryczne metody w analizie nieorganicznej. Warszawa, Naukowe PWN, 1998.
- [3] 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.).
- [4] Blesa M.A., Weisz A.D., Morando P.J., et al. The interaction of metal oxide surfaces with complexing agents dissolved in water. *Coord. Chem. Rev.*, 2000, vol. 196, iss. 1, pp. 31–63. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0010-8545\(99\)00005-3](https://doi.org/10.1016/S0010-8545(99)00005-3)
- [5] Bezdenezhnykh A.A. Inzhenernye metody sostavleniya uravneniy skorostey reaktsiy i rascheta kineticheskikh constant [Engineering methods for compiling reaction rate equations and calculating kinetic constants]. Leningrad, Khimiya Publ., 1973.
- [6] Rahnemaie R. Ion adsorption modeling as a tool to characterize metal (hydro)oxide behavior in soil. PhD thesis. Wageningen Univ., 2005.
- [7] Blesa M.A. Chemical dissolution of metal oxides. CRC Press, 2018.
- [8] Marin G.B., Yablonsky G.S., Constaes D. Kinetics of chemical reactions. Wiley, 2011.
- [9] Yablonsky G.S., Constaes D., Shekhtman S.O., et al. The Y-procedure: how to extract the chemical transformation rate from reaction-diffusion data with no assumption on the kinetic model. *Chem. Eng. Sci.*, 2007, vol. 62, iss. 23, pp. 6754–6767. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2007.04.050>
- [10] Eliseeva E.A., Berezina S.L., Boldyrev V.S., et al. Influence of the morphology of  $\text{Co}_2\text{O}_3$  particles on the kinetics of dissolution in electrolytes. *Tsvetnye metally*, 2020, no. 11, pp. 14–18 (in Russ.).
- [11] Eliseeva E.A., Berezina S.L., Boldyrev V.S., et al. Modeling the process of dissolving iron oxide  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  in an acidic environment. *Chernye metally*, 2020, no. 10, pp. 15–20 (in Russ.).
- [12] Ferraris G.B., Donating G. A powerful method for Hougen — Watson model parameter estimation with integral conversion data. *Chem. Eng. Sci.*, 1974, vol. 29, iss. 6, pp. 1504–1509. DOI: [https://doi.org/10.1016/0009-2509\(74\)80177-6](https://doi.org/10.1016/0009-2509(74)80177-6)
- [13] Latimer W.M. In the oxidation states of the elements and their potentials in aqueous solutions. Prentice-Hall, 1938.
- [14] Stepanov N.F., Erlykina M.E., Filippov G.G. Metody lineynoy algebrы v fizicheskoy khimii [Methods of linear algebra in physical chemistry]. Moscow, MSU Publ., 1976.
- [15] Schmid R., Sapunov V.N. Non-formal kinetics. In search for chemical reaction pathways. Weinheim, Chemie, 1982.
- [16] Brown M.E., Dollimore D., Galwey A.K. Reactions in the solid state. Elsevier, 1980.
- [17] Joungh D. Decomposition of solids. Pergamon Press, 1966.
- [18] Barret P. Cinétique hétérogène. Paris, Gauthier-Villars, 1973.
- [19] Rozovskiy A.Ya. Geterogennye khimicheskie reaktsii [Heterogeneous chemical reactions]. Moscow, Nauka Publ., 1980.

[20] Gorichev I.G., Ashkharua F.G., Vaynman S.K. On the applicability of the topochemical model of dissolution of some oxides in acids. *Zhurn. fiz. khimii*, 1976, vol. 50, no. 6, pp. 1610–1612 (in Russ.).

[21] Petrochenkov V.A., Gorichev I.G., Batrakov V.V., et al. Catalytic effect of ammonia on the kinetics and mechanism of MoO<sub>3</sub> dissolution in alkaline solutions. *Theor. Found. Chem. Eng.*, 2004, vol. 38, no. 4, pp. 386–393.

DOI: <https://doi.org/10.1023/B:TFCE.0000036965.59052.20>

**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).

**Gorichev I.G.** — Dr. Sc. (Chem.), Professor, Department of General Chemistry, Institute of Biology and Chemistry, Moscow Pedagogical State University (Malaya Pirogovskaya ul. 1, str. 1, Moscow, 119991 Russian Federation).

**Please cite this article in English as:**

Eliseeva E.A., Berezina S.L., Gorichev I.G. Kinetics of molybdenum trioxide dissolution in the alkaline medium. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2023, no. 2 (107), pp. 98–109 (in Russ.).

DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2023-2-98-109>