

УДК 546.05+546.776

УПРАВЛЕНИЕ СОЛЬВОТЕРМИЧЕСКИМ СИНТЕЗОМ СМЕШАННЫХ ОКСИДОВ ВАНАДИЯ – МОЛИБДЕНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ

Т. В. СВИРИДОВА¹⁾

¹⁾Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь

Показано, что проведение сольвотермического синтеза смешанного оксида ванадия–молибдена $0,5V_2O_5 : 0,5MoO_3$ в присутствии поверхностно-активных веществ позволяет эффективно управлять фазообразованием и получать игольчатые кристаллы с высоким аспектным отношением. При этом синтез в присутствии полиэтиленгликолей (неионогенных поверхностно-активных веществ) обеспечивает блокирование терминальных ОН-групп на поверхности смешанного оксида и предупреждает спекание образующихся сетчатых структур, характеризующихся высокими значениями отношения поверхность/объем и перспективных для использования в гетерогенном катализе.

Ключевые слова: смешанный оксид ванадия – молибдена; сольвотермический синтез; поверхностно-активные вещества; сетчатые структуры.

Благодарность. Работа была выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (грант № X20P-073).

CONTROLLING THE SOLVOTHERMAL SYNTHESIS OF THE MIXED VANADIUM – MOLYBDENUM OXIDES BY EMPLOYING SURFACTANTS

T. V. SVIRIDOVA^a

^aBelarusian State University, 4 Niezaliežnasci Avenue, Minsk 220030, Belarus

It is shown that the solvothermal synthesis of mixed vanadium–molybdenum oxide $0.5V_2O_5 : 0.5MoO_3$ in the presence of surfactants permits one to exert an effective control over the phase formation and to obtain needle-like crystals exhibiting high aspect ratio. The synthesis in the presence of polyethylene-glycol (non-ionogenic surfactant) ensures blocking of the terminal OH-groups at the surface of mixed oxide thus preventing the agglomeration of arising grid structures with high surface-to-volume ratio showing much promise as the heterogeneous catalysts.

Keywords: mixed vanadium – molybdenum oxide; solvothermal synthesis; surfactants; grid structures.

Acknowledgements. This work was supported by Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research (grant No. Kh20R-073).

Образец цитирования:

Свиридова ТВ. Управление сольвотермическим синтезом смешанных оксидов ванадия – молибдена с использованием поверхностно-активных веществ. *Журнал Белорусского государственного университета. Химия.* 2020;2:76–81.
<https://doi.org/10.33581/2520-257X-2020-2-76-81>

For citation:

Sviridova TV. Controlling the solvothermal synthesis of the mixed vanadium – molybdenum oxides by employing surfactants. *Journal of the Belarusian State University. Chemistry.* 2020;2:76–81. Russian.
<https://doi.org/10.33581/2520-257X-2020-2-76-81>

Автор:

Татьяна Викторовна Свиридова – доктор химических наук; профессор кафедры неорганической химии химического факультета.

Author:

Tatyana V. Sviridova, doctor of science (chemistry); professor at the department of inorganic chemistry, faculty of chemistry.
sviridova@bsu.by

Введение

Процессы термостимулированной поликонденсации оксосоединений переходных металлов (прежде всего оксокислот молибдена, вольфрама, ванадия) открывают широкие возможности в области синтеза смешанных оксидов переменного состава [1–3], способных функционировать в качестве эффективных гетерогенных катализаторов окислительных процессов [4–6]. В случае поликонденсационного синтеза смешанных оксидов $V_2O_5 : MoO_3$ протекание процессов оляции оксокислот-прекурсоров оксидной фазы происходит в условиях, близких к равновесным, что делает возможным образование необычных смешанно-оксидных форм, представляющих собой твердые растворы замещения [3; 7–9]. Последнее позволяет эффективно управлять редокс-состоянием ионов ванадия в оксидной матрице за счет варьирования содержания оксида молибдена. В то же время продукты поликонденсационного синтеза представляют собой ксерогель [1; 3; 10], что делает затруднительным создание на этой основе каталитических систем прикладного назначения [11–13].

В настоящей работе проведено исследование возможности управления фазообразованием при протекании поликонденсационного синтеза смешанного оксида $V_2O_5 : MoO_3$ в сольво-термических условиях за счет введения в реакционный раствор поверхностно-активных веществ.

Методика исследования

Сольво-термический синтез смешанного оксида $V_2O_5 : MoO_3$ в водной среде в присутствии поверхностно-активных добавок, управляющих процессом кристаллизации оксидной фазы, осуществлялся путем термостатирования при 100 °С смеси полученных методом ионного обмена [14] ванадиевой и молибденовой кислот (суммарная концентрация кислот 0,2 моль/л, молярное соотношение 1 : 1). В ходе синтеза объем рабочего раствора поддерживался на постоянном уровне. Для управления ходом фазообразования были использованы поверхностно-активные вещества (ПАВ) различного типа: анионный натрийлаурилсульфат (I), катионный алкилбензилдиметиламмонийхлорид (II), а также полиэтиленгликолевый OC-20 (III), функционирующий как неионогенный ПАВ (рис. 1).

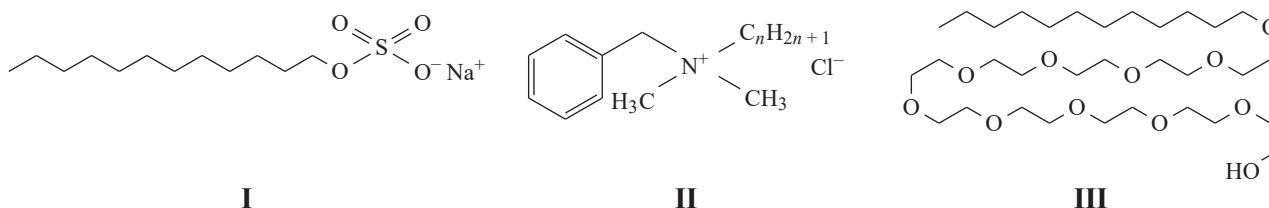


Рис. 1. Поверхностно-активные вещества

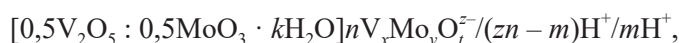
Fig. 1. Surfactants

Во всех случаях ПАВ вводились в рабочий раствор в концентрации 0,02 г/дм³. За кинетикой формирования смешанно-оксидной фазы следили по светорассеянию маточного раствора и текущей величине pH. Общая продолжительность синтеза составляла 240 мин. Значения ξ -потенциала образующихся коллоидных частиц смешанного оксида были измерены с помощью приборов Бертон и измерителя Nanosizer ZS90 (Malvern, Великобритания).

Полученный смешанный оксид $V_2O_5 : MoO_3$ отделялся от маточного раствора центрифугированием, его фазовый состав определялся с использованием дифрактометра (излучение CuK_α) PANalytical Empyrean (Нидерланды). Морфология синтезированных оксидных фаз исследовалась с помощью сканирующей электронной микроскопии (электронный микроскоп LEO-1420, Carl Zeiss, Германия).

Результаты и их обсуждение

Формирующиеся в ходе сольво-термического синтеза оксидные частицы V_2O_5 и MoO_3 имеют отрицательный заряд и характеризуются значениями ξ -потенциала, лежащими в области –100 мВ. Изменение кислотности среды в ходе синтеза [2; 15] влияет на заряд растущих оксидно-гидроксидных частиц, которые можно представить в качестве мицелл следующего состава:



где $V_x Mo_y O_z^{z-}$ соответствуют анионам поливанадий-молибденовой кислоты, адсорбированной на поверхности формирующихся смешанно-оксидных мицелл.

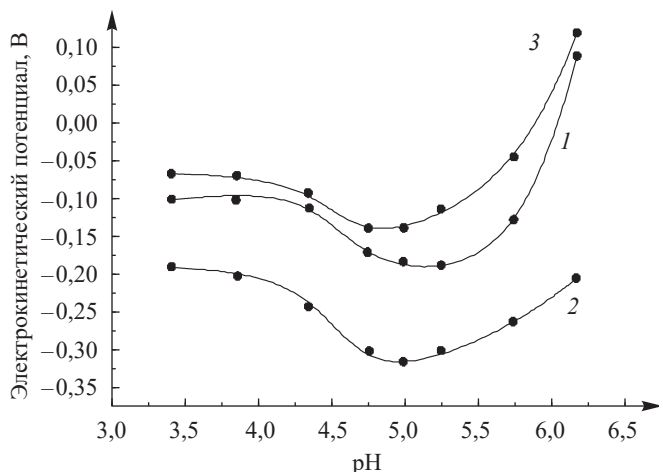


Рис. 2. Зависимость ζ -потенциала коллоидных частиц $0,5V_2O_5 : 0,5MoO_3$ от кислотности среды в отсутствие в растворе ПАВ (1), в присутствии в растворе ПАВ I (2), ПАВ II (3)

Fig. 2. The pH-dependence of ζ -potential of colloidal $0,5V_2O_5 : 0,5MoO_3$ particles (1) in the absence of surfactants in the solution; in the presence of surfactants: I (2) and II (3)

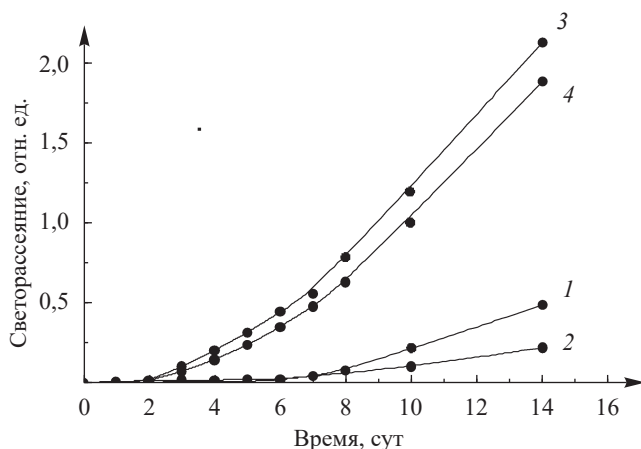


Рис. 3. Кинетические кривые изменения светорассеяния реакционной среды в ходе спонтанной поликонденсации в 0,2 моль/л раствора смешанной оксокислоты ванадия и молибдена $0,5V_2O_5 : 0,5MoO_3$ в отсутствие в растворе ПАВ (1), в присутствии в растворе ПАВ I (2), ПАВ II (3), ПАВ III (4)

Fig. 3. Time dependence of light scattering of reaction medium obtained during the spontaneous polycondensation in 0.2 mol/L solution of the mixed vanadic–molybdic acid in the absence of surfactants (1), in the presence of surfactants: I (2), II (3) and III (4)

в присутствии катионного ПАВ II образуются палочкообразные кристаллы мультимикронной длины (подобные игольчатым кристаллам индивидуальных оксидов V_2O_5 и MoO_3 , формирующихся в жестких гидротермальных условиях [21–23]). Таким образом, адсорбция ПАВ на оксидной поверхности затрудняет рост протяженных оксидных ламелей. В результате увеличение кристаллитов $V_2O_5 : MoO_3$, осуществляющееся за счет коагуляции первичных смешанно-оксидных частиц, которая протекает особенно эффективно в случае катионных ПАВ, увеличивает электрокинетический потенциал, начинает носить однонаправленный характер. Наиболее ярко тенденция к направленному росту частиц смешанного оксида $V_2O_5 : MoO_3$ проявляется в случае неионогенного ПАВ III, в присутствии которого в ходе сольвотермического синтеза формируются усы из смешанного оксида, имеющие длину в десятки микрон (см. рис. 4).

Результатом изменения зарядового состояния частиц является соответствующий сдвиг ζ -потенциала (рис. 2). Наблюдающийся при этом сложный характер pH-зависимости электрокинетического потенциала обусловлен деполимеризацией мицеллярных частиц в области достижения изоэлектрической точки [16–18]. Присутствие в реакционном растворе анионного ПАВ I приводит к уменьшению электрокинетического потенциала (см. рис. 2), что снижает эффективность поликонденсационного синтеза и уменьшает общую скорость образования оксидной фазы (как в условиях термостимулированного синтеза, так и в условиях спонтанной поликонденсации (рис. 3)).

В то же время введение в реакционную среду катионного ПАВ II сопровождается перезарядкой оксидных частиц, что приводит к эффективной коалесценции последних и резко (в 5–7 раз) увеличивает скорость образования оксидной фазы в результате поликонденсационного синтеза. Аналогичное существенное возрастание скорости накопления смешанно-оксидной фазы наблюдается также в присутствии в реакционной среде неионогенного ПАВ III (см. рис. 3). Можно предположить, что роль указанного соединения как регулятора фазообразования состоит в пространственной ориентации олигомеров смешанной оксокислоты, что способствует дальнейшему протеканию процессов оляции [19; 20].

Проведение сольвотермического синтеза в присутствии ПАВ существенным образом сказывается не только на ходе фазообразования, но и на дальнейшей конверсии первичных оксидных частиц в макроскопические кристаллы. Как видно из рис. 4, в присутствии ПАВ формируются не компактные частицы слоистого строения, а игольчатые (палочкообразные) кристаллы, причем природа управляющего фазообразованием соединения (тип используемого ПАВ) существенно влияет на величину аспектного отношения. Так, смешанно-оксидные частицы $V_2O_5 : MoO_3$, образующиеся в процессе сольвотермического синтеза в присутствии анионного ПАВ I, представляют собой иглы длиной несколько десятков нанометров (см. рис. 4), в то время как

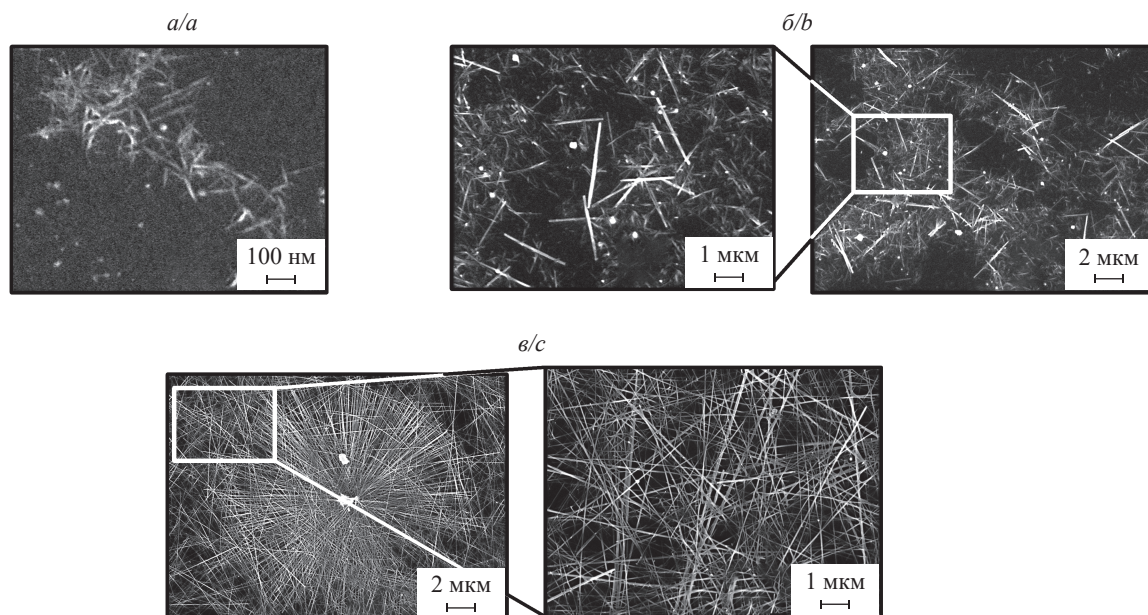


Рис. 4. Электронно-микроскопические изображения частиц $0.5V_2O_5 : 0.5MoO_3$, полученных в присутствии ПАВ I (а), ПАВ II (б), ПАВ III (в)

Fig. 4. Electron micrographs of $0.5V_2O_5 : 0.5MoO_3$ particles grown in the presence of surfactants: I (a), II (b) and III (c)

Такой эффективный контроль за фазообразованием можно объяснить пассивацией периферийных ОН-групп у формирующихся частиц (в том числе с участием собственных гидроксильных групп поверхностно-активного соединения [24]), а также считать следствием выстраивания «хвостов» адсорбированных молекул таким образом, чтобы сохранялось только одно направление преимущественного роста смешанно-оксидной фазы [25]. Следует отметить, что, в отличие от катионных и анионных ПАВ, неионогенные ПАВ оказываются в состоянии обеспечить надежное блокирование терминальных гидроксильных групп на поверхности синтезированной оксидной фазы, что предупреждает спекание смешанного оксида в ходе дальнейшей термообработки (последнее хорошо прослеживается на рис. 5, который свидетельствует о том, что иглообразные кристаллы, полученные в присутствии ПАВ I и ПАВ II, при прогреве конвертируются в сплошную оксидную массу, в то время как аналогичные частицы, синтезированные в присутствии ПАВ III, сохраняются при прогреве в неизменном виде).

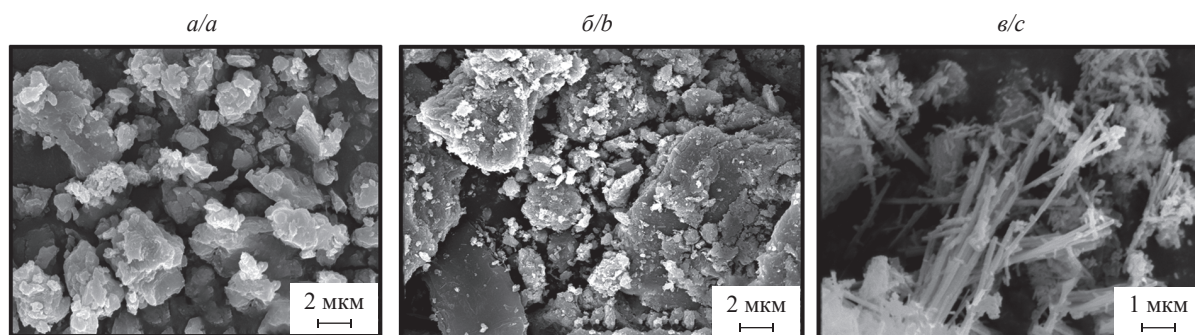


Рис. 5. Электронно-микроскопические изображения смешанно-оксидных частиц $0.5V_2O_5 : 0.5MoO_3$, подвергнутых отжигу при $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 1 ч. Синтез смешанно-оксидных частиц выполнен в присутствии ПАВ I (а), ПАВ II (б), ПАВ III (в)

Fig. 5. Electron micrographs of $0.5V_2O_5 : 0.5MoO_3$ particles annealed at $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ for 1 h. The synthesis of mixed-oxide was performed in the presence of surfactants: I (a), II (b) and III (c)

Последнее обстоятельство открывает возможность получения сетчатых смешанно-оксидных структур с высоким отношением поверхность/объем [26–28], способных сохраняться в процессе функционирования при повышенных температурах, что позволяет рассматривать процессы управляемого поликонденсационного синтеза в присутствии неионогенных ПАВ в качестве перспективного метода создания смешанно-оксидных гетерогенных катализаторов и химической инженерии их поверхности.

Библиографические ссылки

1. Jolivet J-P, Henry M, Livage J. *Metal oxide chemistry and synthesis: from solution to solid state*. Chichester: Weinheim Wiley; 2000. 321 p.
2. Sviridova TV, Stepanova LI, Sviridov DV. Nano- and microcrystals of molybdenum trioxide and metal-matrix composites on their basis. In: Ortiz M, Herrera T, editors. *Molybdenum: characteristics, production and application*. New York: Nova Science; 2012. p. 147–179.
3. Свиридова ТВ, Антонова АА, Кокорин АИ, Дегтярев ЕН, Свиридов ДВ. Наноструктурированные смешанные молибден-ванадиевые оксиды, синтезированные сольвотермическим методом. *Химическая физика*. 2015;34(1):25–31. DOI: 10.7868/S0207401X15010112.
4. Вахрушин ПА, Свиридова ТВ, Вишнецкая МВ, Свиридов ДВ, Кокорин АИ. Окисление додекана на ванадий-молибденом катализаторе. *Химическая физика*. 2012;31(11):28–32. DOI: 10.1134/S1990793112060164.
5. Барабошина АА, Свиридова ТВ, Кокорин АИ, Коварский АЛ, Свиридов ДВ. Твердофазный синтез смешанного молибден-ванадиевого оксида тубулярной морфологии. *Химическая физика*. 2016;35(2):26–32. DOI: 10.7868/S0207401X16020035.
6. Бойков ЕВ, Свиридова ТВ, Вишнецкая МВ, Свиридов ДВ, Кокорин АИ. Окисление бензола в присутствии тиюфена на ванадий-молибденом катализаторе. *Химическая физика*. 2013;32(5):50–54. DOI: 10.7868/S0207401X13050026.
7. Антонова АА, Свиридова ТВ, Бойков ЕВ, Карпушенков СА, Кокорин АИ, Свиридов ДВ. Сольвотермический синтез смешанно-оксидных молибден-ванадиевых катализаторов. В: Ивашкевич ОА, редактор. *Свиридовские чтения. Выпуск 8*. Минск: БГУ; 2012. с. 7–14.
8. Giebel L, Wirth A, Martens JA, Vogel H, Fuess H. Phase transitions of V–Mo–W mixed oxides during reduction/re-oxidation cycles. *Applied Catalysis A: General*. 2010;379(1–2):155–165. DOI: 10.1016/j.apcata.2010.03.022.
9. Langeslay RR, Kaphan DM, Marshall CL, Stair PC, Sattelberger AP, Delferro M. Catalytic applications of vanadium: a mechanistic perspective. *Chemical Reviews*. 2019;119(4):2128–2191. DOI: 10.1021/acs.chemrev.8b00245.
10. Свиридова ТВ, Антонова АА, Бойков ЕВ, Вишнецкая МВ, Свиридов ДВ, Кокорин АИ. Окисление бензола и тиюфена на смешанном наноструктурированном ванадий-молибденом оксиде. *Химическая физика*. 2013;32(4):29–34. DOI: 10.7868/S0207401X13040134.
11. Свиридова ТВ, Кокорин АИ, Свиридов ДВ. Превращения смешанных молибден-ванадиевых оксидов в процессах окисления углеводородов молекулярным кислородом. *Химическая физика*. 2013;32(11):69–74. DOI: 10.7868/S0207401X13110101.
12. Свиридова ТВ, Кокорин АИ, Антонова АА, Свиридов ДВ. Термоиндуцированные превращения в наноструктурированных смешанных молибден-ванадиевых оксидах, синтезированных сольвотермическим методом. *Химическая физика*. 2015;34(2):16–23. DOI: 10.7868/S0207401X15020107.
13. Свиридова ТВ, Антонова АА, Кокорин АИ, Свиридов ДВ. Агрегационно-термическая устойчивость смешанно-оксидных молибден-ванадиевых фаз. В: Ивашкевич ОА, редактор. *Свиридовские чтения. Выпуск 9*. Минск: БГУ; 2013. с. 169–176.
14. Саидахмедов УА, Ареланов ШС. Ионнообменное получение вольфрамовой, молибденовой и ванадиевой кислот. *Журнал прикладной химии*. 1996;69(1):35–42.
15. Свиридова ТВ. Сольвотермический синтез метастабильных оксидов молибдена, вольфрама и ванадия. *Журнал Белорусского государственного университета. Химия*. 2020;1:32–39. DOI: 10.33581/2520-257X-2020-1-32-39.
16. Яцимирский КБ, Алексеева ИИ. О состоянии молибденовой кислоты в слабокислых растворах. *Журнал неорганической химии*. 1959;4(4):818–823.
17. Leong WL, Vittal JJ. One-dimensional coordination polymers: complexity and diversity in structures, properties, and applications. *Chemical Reviews*. 2011;111(2):688–764. DOI: 10.1021/cr100160e.
18. Пицюга ВГ, Пожарская ЛА. О природе воды в гидратах окислов молибдена и вольфрама. *Доклады АН СССР*. 1978;13(3):249–252.
19. Zhang Y, Chen C, Wu W, Niu F, Liu X, Zhong Y, et al. Facile hydrothermal synthesis of vanadium oxides nanobelts by ethanol reduction of peroxovanadium complexes. *Ceramics International*. 2013;39(1):129–141. DOI: 10.1016/j.ceramint.2012.06.001.
20. Sierka M. Synergy between theory and experiment in structure resolution of low-dimensional oxides. *Progress in Surface Science*. 2010;85(9):398–434. DOI: 10.1016/j.progsurf.2010.07.004.
21. Guo J, Zavalij P, Whittingham MS. Metastable hexagonal molybdates: hydrothermal preparation, structure and reactivity. *Journal of Solid State Chemistry*. 1995;117(2):323–332. DOI: 10.1006/jssc.1995.1280.
22. Мозолевская (Свиридова) ТВ, Степанова ЛИ. Гидротермальный синтез высокодисперсного триоксида молибдена. *Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия химических наук*. 2003;1:17–21.
23. Барабошина АА, Свиридова ТВ, Кокорин АИ, Дегтярев ЕН, Ромашевская ЕИ, Свиридов ДВ. Смешанные молибден-ванадиевые оксиды, синтезированные гидротермальным методом. *Химическая физика*. 2015;34(9):44–48. DOI: 10.7868/S0207401X15090034.
24. Gowtham B, Ponnuswamy V, Pradeesh G, Chandrasekaran J, Aradhana D. MoO₃ overview: hexagonal plate-like MoO₃ nanoparticles prepared by precipitation method. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2018;29:6835–6843. DOI: 10.1007/s10854-018-8670-7.
25. Bielanski A, Najbar M. V₂O₅–MoO₃ catalysts for benzene oxidation. *Applied Catalysis A: General*. 1997;157(1–2):223–261. DOI: 10.1016/S0926-860X(97)00018-5.
26. Najbar M, Stadnicka K. Structural relationships in the low-temperature evolution of V₂O₅–MoO₃ catalysts. *Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions*. 1983;79(1):27–37. DOI: 10.1039/F19837900027.
27. Bakar WAWA, Ali R, Kadir AAA, Mokhtar WNAW. Effect of transition metal oxides catalysts on oxidative desulfurization of model diesel. *Fuel Processing Technology*. 2012;101:78–84. DOI: 10.1016/j.fuproc.2012.04.004.
28. Kihlberg L. The crystal structure of (Mo_{0.3}V_{0.7})₂O₅ of R-Nb₂O₅ type and a comparison with the structures of V₂O₅ and V₂MoO₈. *Acta Chemica Scandinavica*. 1967;21:2495–2502. DOI: 10.3891/acta.chem.scand.21-2495.

References

1. Jolivet J-P, Henry M, Livage J. *Metal oxide chemistry and synthesis: from solution to solid state*. Chichester: Weinheim Wiley; 2000. 321 p.
2. Sviridova TV, Stepanova LI, Sviridov DV. Nano- and microcrystals of molybdenum trioxide and metal-matrix composites on their basis. In: Ortiz M, Herrera T, editors. *Molybdenum: characteristics, production and application*. New York: Nova Science; 2012. p. 147–179.
3. Sviridova TV, Antonova AA, Kokorin AI, Degtyarev EN, Sviridov DV. Nanostructured vanadium-molybdenum mixed oxides prepared by the solvothermal method. *Khimicheskaya fizika*. 2015;34(1):25–31. Russian. DOI: 10.7868/S0207401X15010112.
4. Vakhrushin PA, Sviridova TV, Vishnetskaya MV, Sviridov DV, Kokorin AI. Oxidation of dodecane on vanadium-molybdenum catalysts. *Khimicheskaya fizika*. 2012;31(11):28–32. Russian. DOI: 10.1134/S1990793112060164.
5. Baraboshina AA, Sviridova TV, Kokorin AI, Kovarsky AL, Sviridov DV. Solid-state synthesis of molybdenum-vanadium mixed oxide of tubular morphology. *Khimicheskaya fizika*. 2016;35(2):26–32. Russian. DOI: 10.7868/S0207401X16020035.
6. Boikov EV, Sviridova TV, Vishnetskaya MV, Sviridov DV, Kokorin AI. Oxidation of benzene on a vanadium-molybdenum catalyst in the presence of thiophene. *Khimicheskaya fizika*. 2013;32(5):50–54. Russian. DOI: 10.7868/S0207401X13050026.
7. Antonova AA, Sviridova TV, Boikov EV, Karpushenkov SA, Kokorin AI, Sviridov DV. Solvothermal synthesis of mixed oxide molybdenum-vanadium catalysts. In: Ivashkevich OA, editor. *Sviridovskie chteniya. Volume 8*. Minsk: Belarusian State University; 2012. p. 7–14. Russian.
8. Giebel L, Wirth A, Martens JA, Vogel H, Fuess H. Phase transitions of V-Mo-W mixed oxides during reduction/re-oxidation cycles. *Applied Catalysis A: General*. 2010;379(1–2):155–165. DOI: 10.1016/j.apcata.2010.03.022.
9. Langeslay RR, Kaphan DM, Marshall CL, Stair PC, Sattelberger AP, Delferro M. Catalytic applications of vanadium: a mechanistic perspective. *Chemical Reviews*. 2019;119(4):2128–2191. DOI: 10.1021/acs.chemrev.8b00245.
10. Sviridova TV, Antonova AA, Boikov EV, Vishnetskaya MV, Sviridov DV, Kokorin AI. Oxidation of benzene and thiophene on a nanostructured vanadium-molybdenum mixed oxide. *Khimicheskaya fizika*. 2013;32(4):29–34. Russian. DOI: 10.7868/S0207401X13040134.
11. Sviridova TV, Kokorin AI, Sviridov DV. Transformations of mixed molybdenum-vanadium oxides in the oxidation of hydrocarbons by molecular oxygen. *Khimicheskaya fizika*. 2013;32(11):69–74. Russian. DOI: 10.7868/S0207401X13110101.
12. Sviridova TV, Kokorin AI, Antonova AA, Sviridov DV. Thermally induced transformations in nanostructured molybdenum-vanadium oxides synthesized by a solvothermal method. *Khimicheskaya fizika*. 2015;34(2):16–23. Russian. DOI: 10.7868/S0207401X15020107.
13. Sviridova TV, Antonova AA, Kokorin AI, Sviridov DV. Agregative-thermal stability of mixed oxide molybdenum-vanadium phases. In: Ivashkevich OA, editor. *Sviridovskie chteniya. Volume 9*. Minsk: Belarusian State University; 2013. p. 169–176. Russian.
14. Saidakhmedov UA, Arelanov ShS. [Ion exchange production of tungsten, molybdenum and vanadium acids]. *Zhurnal prikladnoi khimii*. 1996;69(1):35–42. Russian.
15. Sviridova TV. Solvothermal synthesis of metastable molybdenum, tungsten and vanadium oxides. *Journal of the Belarusian State University. Chemistry*. 2020;1:32–39. Russian. DOI: 10.33581/2520-257X-2020-1-32-39.
16. Yatsimirsky KB, Alekseeva II. [On the state of molybdenum acid in slightly acidic solutions]. *Zhurnal neorganicheskoi khimii*. 1959;4(4):818–823. Russian.
17. Leong WL, Vittal JJ. One-dimensional coordination polymers: complexity and diversity in structures, properties, and applications. *Chemical Reviews*. 2011;111(2):688–764. DOI: 10.1021/cr100160e.
18. Pitsyuga VG, Pozharskaya LA. [On the nature of water in hydrates of molybdenum and tungsten oxides]. *Doklady AN SSSR*. 1978;13(3):249–252. Russian.
19. Zhang Y, Chen C, Wu W, Niu F, Liu X, Zhong Y, et al. Facile hydrothermal synthesis of vanadium oxides nanobelts by ethanol reduction of peroxovanadium complexes. *Ceramics International*. 2013;39(1):129–141. DOI: 10.1016/j.ceramint.2012.06.001.
20. Sierka M. Synergy between theory and experiment in structure resolution of low-dimensional oxides. *Progress in Surface Science*. 2010;85(9):398–434. DOI: 10.1016/j.progsurf.2010.07.004.
21. Guo J, Zavaliy P, Whittingham MS. Metastable hexagonal molybdates: hydrothermal preparation, structure and reactivity. *Journal of Solid State Chemistry*. 1995;117(2):323–332. DOI: 10.1006/jssc.1995.1280.
22. Mozolevskaya (Sviridova) TV, Stepanova LI. [Hydrothermal synthesis of highly dispersed molybdenum trioxide]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical Series*. 2003;1:17–21. Russian.
23. Baraboshina AA, Sviridova TV, Kokorin AI, Degtyarev EN, Romashevskaya EI, Sviridov DV. Molybdenum-vanadium mixed oxides synthesized by the hydrothermal method. *Khimicheskaya fizika*. 2015;34(9):44–48. Russian. DOI: 10.7868/S0207401X15090034.
24. Gowtham B, Ponnuswamy V, Pradeesh G, Chandrasekaran J, Aradhana D. MoO₃ overview: hexagonal plate-like MoO₃ nanoparticles prepared by precipitation method. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2018;29:6835–6843. DOI: 10.1007/s10854-018-8670-7.
25. Bielanski A, Najbar M. V₂O₅–MoO₃ catalysts for benzene oxidation. *Applied Catalysis A: General*. 1997;157(1–2):223–261. DOI: 10.1016/S0926-860X(97)00018-5.
26. Najbar M, Stadnicka K. Structural relationships in the low-temperature evolution of V₂O₅–MoO₃ catalysts. *Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions*. 1983;79(1):27–37. DOI: 10.1039/F19837900027.
27. Bakar WAWA, Ali R, Kadir AAA, Mokhtar WNAW. Effect of transition metal oxides catalysts on oxidative desulfurization of model diesel. *Fuel Processing Technology*. 2012;101:78–84. DOI: 10.1016/j.fuproc.2012.04.004.
28. Kihlberg L. The crystal structure of (Mo_{0.3}V_{0.7})₂O₅ of R-Nb₂O₅ type and a comparison with the structures of V₂O₅ and V₂MoO₈. *Acta Chemica Scandinavica*. 1967;21:2495–2502. DOI: 10.3891/acta.chem.scand.21-2495.

Статья поступила в редакцию 20.06.2020.
Received by editorial board 20.06.2020.