

Научная статья
УДК 661.877
doi: 10.17223/24135542/40/4

Синтез и свойства комплексных Ni(Co)Mo-содержащих соединений

Альберт Софонович Акимов¹, Сергей Петрович Журавков²,
Аким Семенович Акимов³

^{1, 3} Институт химии нефти Сибирского отделения
Российской академии наук, Томск, Россия

² Томский политехнический университет, Томск, Россия

¹ akimov149@yandex.ru

² zhursp@yandex.ru

³ zerobox70@mail.ru

Аннотация. Синтезированы комплексные соединения на основе лимонной кислоты и никель- (cobальт-) и молибден-содержащих соединений. Продемонстрирована возможность использования полиоксометаллатного соединения (молибденовой сини) в качестве источника молибдена. Свойства полученных комплексов охарактеризованы методами рентгенофазового анализа и ИК-спектроскопии. Показано, что синтезированные комплексы являются перспективными прекурсорами для приготовления высокоактивных катализаторов гидроочистки.

Ключевые слова: комплексные соединения, полиоксометаллатные соединения, лимонная кислота

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственного задания ИХН СО РАН, финансируемого Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (Проект № 121031200182-5).

Для цитирования: Акимов Ал.С., Журавков С.П., Акимов А.С. Синтез и свойства комплексных Ni(Co)Mo-содержащих соединений // Вестник Томского государственного университета. Химия. 2025. № 40. С. 34–43. doi: 10.17223/24135542/40/4

Original article
doi: 10.17223/24135542/40/4

Synthesis and properties of complex Ni(CO)Mo-containing compounds

Albert S. Akimov¹, Sergey P. Zhuravkov², Akim S. Akimov³

^{1, 3} Institute of Petroleum Chemistry of the Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russian Federation

² Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

¹ akimov149@yandex.ru

²zhurusp@yandex.ru

³zerobox70@mail.ru

Abstract. The work synthesized complex compounds based on citric acid and nickel (cobalt) and molybdenum-containing compounds. The possibility of using a polyoxometal compound (molybdenum blue) as a source of Mo-containing was demonstrated. The properties of the obtained complexes are characterized by methods of x-ray analysis and IR spectroscopy. It is shown that synthesized complexes are per-conductive precursors for the preparation of highly active hydraulic catalysts.

Keywords: complex compounds, polyoxometallates compounds, citric acid

Acknowledgments: The work was done within the framework of the state assignment of the Institute of Petroleum Chemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Project No. 121031200182-5).

For citation: Akimov, Al.S., Zhuravkov, S.P., Akimov, A.S. Synthesis and properties of complex Ni(CO)Mo-containing compounds. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Chimia – Tomsk State University Journal of Chemistry*, 2025, 40, 34–43. doi: 10.17223/24135542/40/4

Введение

Комплексные соединения молибдена (Mo), никеля (Ni) и кобальта (Co) находят применение в различных областях химии (например, в аналитической химии, неорганическом синтезе, катализе и т.д.) благодаря оптимальному сочетанию свойств: хорошей растворимости в воде, биосовместимости и способности образовывать хелатные соединения одновременно с несколькими металлами [1]. Свое применение они также нашли в нефтепереработке, в частности для приготовления катализаторов одного из наиболее крупнотоннажных процессов – гидроочистки [2].

Для синтеза соответствующих комплексных соединений Mo, Ni и Co, а также для последующего получения катализитических систем и катализаторов на их основе применяются различные комплексообразователи. В целом в мировой практике использование различных комплексообразователей для приготовления Co(Ni)Mo катализаторов гидроочистки считается современным приемом получения высокоактивных систем.

Наряду с наиболее часто используемыми комплексообразователями в настоящее время для приготовления Ni(Co)Mo-содержащих катализитических систем также применяют лимонную кислоту [3]. Использование лимонной кислоты позволяет увеличить дисперсность частиц Ni(Co)Mo-содержащего активного компонента; снизить температуры сульфидирования Ni или Co; увеличить стабильность Ni(Co)Mo-содержащего раствора за счет предотвращения агломерации молибдена; увеличить доли промотирования Ni или Co сульфида молибдена; увеличить активность Co(Ni)Mo-катализаторов в реакциях гидродесульфирования и гидродаэзотирования.

Также стоит отметить, что благодаря коммерческой доступности и отсутствию в своем составе азота, который является ингибитором целевых реакций и который присутствует, например, в ЭДТА и НТА, лимонная кислота

в настоящее время является наиболее предпочтительным комплексообразователем для приготовления Ni(Co)Mo-содержащих систем как в лабораторной, так и в промышленной практике.

Несмотря на общность мнений в литературе относительно механизма действия комплексообразователей, в том числе и лимонной кислоты, некоторые различия, а иногда и противоречия, все-таки присутствуют. Например, остается не совсем понятным, интегрируется ли основной металл Mo в единый комплекс с промотором, т.е. с Ni или Co, при использовании соответствующих традиционных соединений (например, нитратов или ацетатов Ni или Co, молибдата аммония или триоксида Mo, комплексообразователя – лимонной кислоты).

Стоит отметить, что в открытых литературных источниках отсутствует информация о взаимодействии лимонной кислоты с перспективными Mo-содержащими соединениями – полиоксометаллатными соединениями, в частности, молибденовыми синями.

Таким образом, цель данной работы – синтез и исследование комплексных соединений на основе лимонной кислоты и Ni(Co)Mo-содержащих соединений.

Методы

В качестве исходных компонентов для синтеза комплексных соединений использовали коммерческие реагенты (без стадии дополнительной очистки): гидроксид никеля (II) $\text{Ni}(\text{OH})_2$, гидроксид кобальта (II) $\text{Co}(\text{OH})_2$, молибдат аммония $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, лимонную кислоту $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7 \cdot \text{H}_2\text{O}$. Молибденовую синь получали по оригинальной методике, суть которой заключается в следующем: к предварительно механоактивированному дисульфиду молибдена добавляли перекись водорода (ООО «Инновация») и глюкозу в качестве восстановителя. Более подробная информация по синтезу сини приведена в работе [4].

Синтез Ni и Co-содержащего комплекса осуществляли следующим образом: в дистиллированной воде последовательно растворяли лимонную кислоту и гидроксид никеля – в случае получения Ni-содержащего комплекса, гидроксид кобальта – для получения Co-содержащего комплекса. Компоненты были взяты в таком количестве, чтобы в конечном комплексе содержание металла (никеля или кобальта) составляло 3 мас. %. К полученному раствору при перемешивании добавляли предварительно охлажденный (5°C) пятикратный избыток изопропилового спирта, и в зависимости от выбранного металла образовывался осадок либо зеленого цвета (далее обозначен как *Ni-citr*), либо темно-розового (*Co-citr*), который затем отделяли на фильтре и промывали спиртом, а затем сушили в вытяжном шкафу до постоянной массы.

Синтез и выделение Mo-содержащего комплекса осуществляли аналогично Ni(Co)-содержащему комплексу с той лишь разницей, что вместо гидроксидов использовали молибдат аммония, а также количество исходных

компонентов бралось с учетом того, чтобы в конечном комплексе содержание молибдена составляло 9%.

Синтез комплекса, где источником молибдена выступала молибденовая соль, осуществляли аналогично Mo-содержащему комплексу, однако вместо молибдата аммония использовали предварительно выделенную соль в виде порошка. Получившийся темно-синий осадок обозначен далее как *MoBl-citr*.

Синтез NiMo- и CoMo-содержащего комплекса осуществляли следующим образом: в дистиллированной воде последовательно растворяли лимонную кислоту, молибдат аммония и гидроксид никеля или кобальта. В данном случае компоненты были взяты в таком количестве, чтобы в конечном комплексе содержание никеля (или кобальта) и молибдена составляло соответственно 3 и 9 мас. %. Как и в предыдущих синтезах, к полученному раствору светло-зеленого (NiMo) или розового (CoMo) цвета в зависимости от выбранного металла при перемешивании добавляли предварительно охлажденный (5°C) пятикратный избыток изопропилового спирта; после этого полученный светло-зеленый (*NiMo-citr*) или розовый осадок (*CoMo-citr*) отделяли на фильтре и промывали спиртом, а потом сушили в вытяжном шкафу до постоянной массы.

Структуру полученных комплексов идентифицировали с использованием метода порошковой рентгеновской дифракции (РФА) и ИК-спектроскопии.

РФА проводили на порошковом дифрактометре D8 Advance, оснащенном одномерным детектором Lynx-Eye и К β -фильтром с CuKa-излучением с длиной волны 0,154 нм. Съемку осуществляли в интервале углов $10^{\circ} < 2\Theta < 84^{\circ}$.

Для исследования методом ИК-Фурье-спектроскопии (Nicolet 5700 фирмы Thermo Fisher Scientific) образцы прессовались в виде дисков со спектрально чистым KBr. Навески образца и матрицы были постоянными, каждый спектр получался в результате 64 сканирований в интервале $400\text{--}4\,000\text{ см}^{-1}$ с разрешением 4 см^{-1} . Расшифровка спектров произведена с привлечением [5–9].

Результаты

На рис. 1 приведена рентгеновская дифрактограмма на примере образца *NiMo-citr*. Анализ профиля дифрактограммы показывает наличие двух широких рефлексов в областях углов $2\Theta = 10\text{--}28^{\circ}$ и $31\text{--}49^{\circ}$. Исходя из этого, можно сделать следующие выводы:

– полное отсутствие узких хорошо разрешенных рефлексов указывает на фазовую чистоту полученного комплекса, а также на отсутствие соединений, которые могли фиксироваться / образоваться в случае недостаточного связывания исходных компонентов в комплекс (гидроксиды никеля, молибдаты, оксиды никеля и молибдена и т.д.);

– достаточная степень дисперсности и, соответственно, отсутствие грубодисперсных кристаллических фаз.

Таким образом, результаты РФА косвенно свидетельствуют об успешном образовании комплекса и указывают на следующие достоинства: отсутствие малоактивных и неактивных в процессе гидроочистки фаз (например,

соответствующих оксидов); отсутствие грубодисперсных кристаллических фаз, наличие которых в последующем нанесении на носитель (оксид алюминия) и активации (сульфидирование) с высокой вероятностью привело бы к формированию индивидуальных сульфидов никеля и молибдена или к образованию малоактивной NiMoS-фазы первого типа.

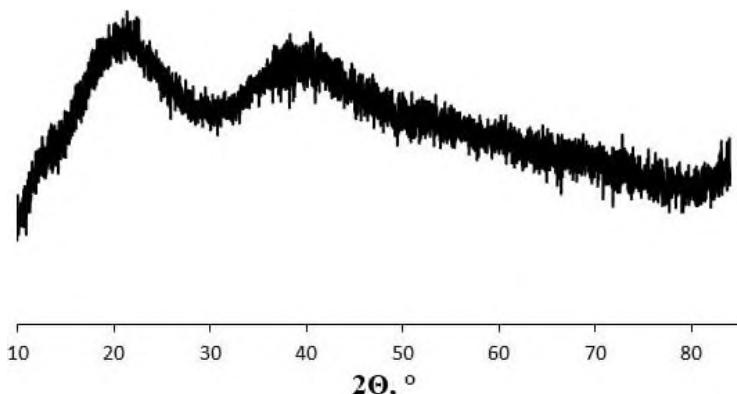


Рис. 1. Рентгеновская дифрактограмма образца *NiMo-citr*

ИК-спектры для изученных образцов (*Ni-citr* и *Co-citr*) приведены на рис. 2.

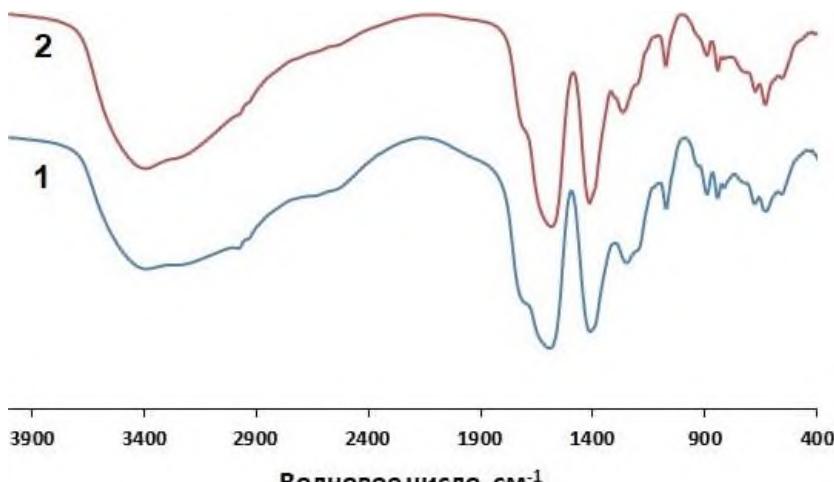


Рис. 2. ИК-спектры образцов: 1 — *Ni-citr*; 2 — *Co-citr*

В целом спектры образцов имеют схожий профиль и, соответственно, близкий набор полос поглощения. Так, у обоих образцов наблюдаются:

— широкая и интенсивная полоса поглощения в области 4 000–3 000 см^{-1} , которую можно отнести к валентным колебаниям гидроксильных групп лимонной кислоты, а также, возможно, к колебаниям адсорбированной воды;

- наличие полос поглощения в областях $1\ 650\text{--}1\ 550\text{ см}^{-1}$ и $1\ 450\text{--}1\ 350\text{ см}^{-1}$, соответствующих асимметричным и симметричным валентным колебаниям карбоксилатных групп соответственно;
- полосы поглощения в области $1\ 300\text{--}1\ 000\text{ см}^{-1}$, которые могут быть отнесены к валентным колебаниям (C–O) и деформационным колебаниям (O–H) фрагментов, что типично для многоосновных карбоновых кислот.

В то же время наблюдаются и некоторые различия. Например, у образца *Ni-citr* присутствует слабоинтенсивная полоса поглощения в области $3\ 000\text{--}2\ 900\text{ см}^{-1}$, которую можно отнести к валентным колебаниям (C–H) связей метильных ($-\text{CH}_3$) и метиленовых групп ($-\text{CH}_2-$) лимонной кислоты. Также отличается набор полос поглощения в широкой области $1\ 000\text{--}400\text{ см}^{-1}$, соответствующий образованию координационных связей Ni–O (*Ni-citr*) и Co–O (*Co-citr*) соответственно. Наличие вышеуказанных полос (Ni–O и Co–O) в низкочастотной области и смещение валентных колебаний карбоксилатной группы с $1\ 750\text{--}1\ 700\text{ см}^{-1}$ до $1\ 650\text{--}1\ 550\text{ см}^{-1}$ подтверждает образование соответствующих цитратных комплексов.

Данные по исследованию образцов *Mo-citr* и *MoBl-citr* методом ИК-спектроскопии приведены на рис. 3. Анализ данных показывает следующие характерные особенности:

- наличие широкой полосы поглощения в области $3\ 000\text{--}900\text{ см}^{-1}$, характерной для валентных колебаний O–H групп;
- наблюдается интенсивная полоса ($1\ 700\text{--}1\ 500\text{ см}^{-1}$), соответствующая валентным колебаниям карбонильных групп (C=O) карбоксильных остатков лимонной кислоты;
- фиксируются полосы поглощения ($1\ 400\text{--}1\ 350\text{ см}^{-1}$), соответствующие валентным колебаниям C=O и деформационным колебаниям O–H карбоксильных групп лимонной кислоты;
- имеется ряд полос средней интенсивности, которые могут быть связаны с валентными колебаниями C–O и деформационными колебаниями O–H.

Вместе с тем наблюдаются явные различия в низкочастотной области $1\ 000\text{--}400\text{ см}^{-1}$. Для образца *Mo-citr* фиксируется полоса поглощения ($1\ 000\text{--}900\text{ см}^{-1}$), указывающая на валентные колебания Mo=O, которая, в свою очередь, характерна для молибдат-содержащих комплексов. Ряд полос поглощения может соответствовать колебаниям Mo–O–Mo (в случае образования оксо-мостиковых структур) или Mo–O в координационной сфере молибден-содержащего комплекса. Наличие же набора полос поглощения ($1\ 000\text{--}600\text{ см}^{-1}$) для образца *MoBl-citr* может соответствовать валентным колебаниям Mo=O и Mo–O–Mo в структурах молибденовой сини или ее производных. Полосы поглощения в области $500\text{--}400\text{ см}^{-1}$ могут быть связаны с деформационными колебаниями Mo–O–C, что подтверждает координацию молибдена с органическим лигандом.

Таким образом, ИК-спектры образцов *Mo-citr* и *MoBl-citr* подтверждают образование комплекса молибдена с лимонной кислотой. Для образца *Mo-citr* наблюдаемые полосы поглощения соответствуют структуре, где лимонная кислота выступает в качестве полидентатного лиганда, координирующего

ионы молибдена через карбоксильные и, возможно, гидроксильные группы. Для образца же *MoBl-citr* результаты свидетельствуют о координации карбоксильных групп с молибденом и формировании структуры, близкой к молибденовой сини, но модифицированной органическим лигандом.

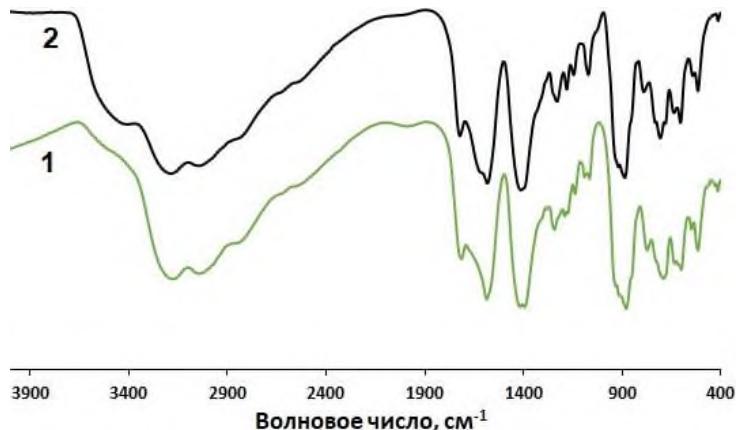


Рис. 3. ИК-спектры образцов: 1 – *Mo-citr*; 2 – *MoBl-citr*

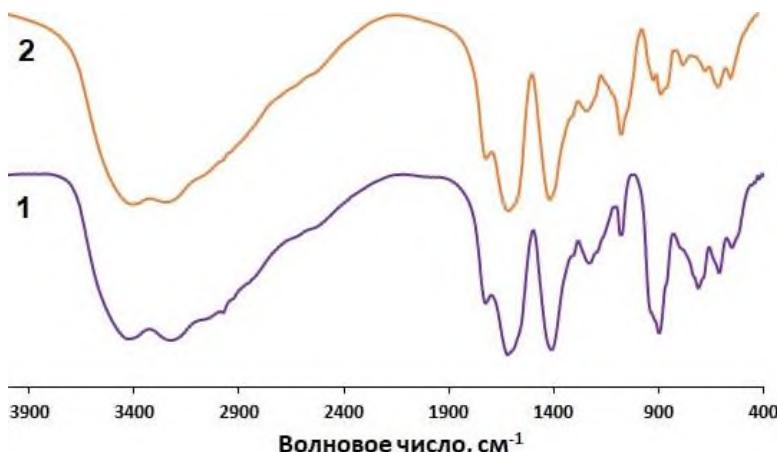


Рис. 4. ИК-спектры образцов: 1 – *NiMo-citr*; 2 – *CoMo-citr*; 3 – *NiMoBl-citr*

ИК-спектры образцов *NiMo-citr*, *CoMo-citr* и *NiMoBl-citr* представлены на рис. 4. Профили спектров для образцов в области 4 000–1 000 см⁻¹ имеют схожий набор полос поглощения. Так, у всех образцов в области 4 000–3 000 см⁻¹ наблюдается широкая полоса, соответствующая валентным колебаниям О–Н-групп лимонной кислоты, а также, возможно, адсорбированной воды. В области 1 600–1 500 см⁻¹ присутствуют интенсивные полосы, относящиеся к асимметричным и симметричным валентным колебаниям карбоксильных групп лимонной кислоты в депротонированной форме (COO⁻), что указывает на координацию лиганда с ионами никеля и кобальта. Полосы

в области 1 400–1 300 см^{-1} соответствуют симметричным колебаниям карбоксилатов. Присутствие ряда полос средней интенсивности в диапазоне 1 200–1 000 см^{-1} , соответствующих валентным колебаниям С–О-связей лимонной кислоты, подтверждает наличие органического лиганда в составе синтезированных структур. Отличия наблюдаются в низкочастотной области (1 000–400 см^{-1}):

– для образцов *NiMo-citr* и *CoMo-citr* наличие набора полос поглощения в области 1 000–800 см^{-1} подтверждает включение молибдат-иона в структуру соответствующих комплексов, а полосы в области 500–400 см^{-1} свидетельствуют о координации никеля и кобальта с кислородсодержащими лигандами;

– в то же время для образца *NiMoBl-citr* наличие полос поглощения в областях 1 000–900 см^{-1} и 900–800 см^{-1} позволяет предположить интеграцию молибденовой сини в качестве структурного компонента в составе синтезированного комплекса. Таким образом, отсутствие полос, характерных для свободной лимонной кислоты (например, карбоксильной группы в кислотной форме при $\sim 1\ 700\ \text{см}^{-1}$) и, наоборот, наличие полос поглощения металлокислородных связей подтверждают успешное образование биметаллических комплексов, что, в свою очередь, создает предпосылки для их дальнейшего применения при приготовлении каталитических систем.

Выводы

В рамках данной работы синтезированы комплексные соединения на основе лимонной кислоты и Ni(Co)Mo-содержащих соединений. Показана возможность использования полиоксометаллатного соединения (молибденовой сини) в качестве источника молибдена наряду с традиционным молибдатом аммония. Согласно данным рентгенографических исследований установлено, что синтезированные комплексы являются рентгеноаморфными, что, в свою очередь, показывает отсутствие неактивных / малоактивных кристаллических фаз, а также их высокую дисперсность. Результаты ИК-спектроскопии подтверждают образование координационных связей между ионами металлов (Ni, Co, Mo) и лимонной кислотой, что проявляется в смещении полос карбоксильных групп, появлении полос $\nu(\text{M}-\text{O})$ в низкочастотной области и отсутствии полос, характерных для свободного лиганда. Для комплексов, синтезированных с привлечением молибденовой сини, выявлена координация лимонной кислоты со структурными фрагментами сини. Полученные комплексы являются перспективными прекурсорами для приготовления катализаторов гидроочистки, поскольку их структура может способствовать формированию высокодисперсных сульфидных фаз.

Список источников

1. Wen D., You Z., Tian K., Wang Z. Recovery of NiFe_2O_4 from wastewater containing nickel citrate complexes and its application to activate peroxyomonosulfate // Journal of Environmental Chemical Engineering. 2023. Vol. 11. Art. 109422.

2. Vatutina Yu.V., Nadeina K.A., Klimov O.V., Kazakov M.O., Danilova I.G., Cherepanova S.V., Khabibulin D.F., Gerasimov E.Yu., Prosvirin I.P., Dik P.P., Noskov A.S. Peptization of alumina by ammonia to adjust catalytic properties of NiMo/B-Al₂O₃ hydrotreating catalysts // *Catalysis Today*. 2021. Vol. 375. P. 377–392.
3. Chen J., Mi J., Li K., Wang X. Role of citric acid in preparing highly active CoMo/Al₂O₃ catalyst: from aqueous impregnation solution to active site formation // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2017. Vol. 56. P. 14172–14181.
4. Akimov Al., Zhirov N., Prosvirin I., Gerasimov E., Akimov A. Synthesis of polyoxometalate compounds based on mechanically activated precursors and study of their physicochemical properties // *Journal of Solid State Chemistry*. 2025. Vol. 349. Art. 125420.
5. Modec B., Dolenc D. Molybdenum complexes with citrate revisited. A mononuclear [MoVOCl₄(H₂O)]⁻ ion as a new synthetic entry // *Inorganica Chimica Acta*. 2019. Vol. 495. Art. 119006.
6. Zhou Z-H., Wan H., Tsai K. Molybdenum(VI) complex with citric acid: synthesis and structural characterization of 1:1 ratio citrato molybdate K₂Na₄[(MoO₂)₂(cit)₂]·5H₂O // *Polyhedron*. 1997. Vol. 16. P. 75–79.
7. Zhang R., Zhou X., Guo Y-C., Chen M., Cao Z., Chow Y., Zhou Z. Crystalline and solution chemistry of tetrameric and dimeric molybdenum(VI) citrato complexes // *Inorganica Chimica Acta*. 2013. Vol. 406. P. 27–36.
8. Bayot D., Tinant B., Devillers M. Spectroscopic and structural characterizations of ammonium peroxy-carboxylato molybdate(VI) complexes // *Inorganica Chimica Acta*. 2004. Vol. 357. P. 809–816.
9. Harrison C., Li X., Hopkinson I., Stratford S., Guy A., Orpen J. Ultraviolet-visible-near-infrared and EXAFS study of Coll coordination chemistry in post-doped silica sol-gel glasses // *Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions*. 1993. Vol. 89. P. 4115–4122.

References

1. Wen, D; You, Z.; Tian, K.; Wang, Z. Recovery of NiFe₂O₄ from wastewater containing nickel citrate complexes and its application to activate peroxymonosulfate. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2023, 11, 109422.
2. Vatutina, Yu.V.; Nadeina, K.A.; Klimov, O.V.; Kazakov, M.O.; Danilova, I.G.; Cherepanova, S.V.; Khabibulin, D.F.; Gerasimov, E.Yu.; Prosvirin, I.P.; Dik, P.P.; Noskov, A.S. Peptization of alumina by ammonia to adjust catalytic properties of NiMo/B-Al₂O₃ hydrotreating catalysts. *Catalysis Today*. 2021, 375, 377-392.
3. Chen, J.; Mi, J.; Li, K.; Wang, X. Role of citric acid in preparing highly active CoMo/Al₂O₃ catalyst: from aqueous impregnation solution to active site formation. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2017, 56, 14172-14181.
4. Akimov, Al.; Zhirov, N.; Prosvirin, I.; E. Gerasimov, Yu.; Akimov A. Synthesis of polyoxometalate compounds based on mechanically activated precursors and study of their physicochemical properties. *Journal of Solid State Chemistry*. 2025, 349, 125420.
5. Modec, B.; Dolenc, D. Molybdenum complexes with citrate revisited. A mononuclear [MoVOCl₄(H₂O)]⁻ ion as a new synthetic entry. *Inorganica Chimica Acta*. 2019, 495, 119006.
6. Zhou, Z-H.; Wan, H.; Tsai, K. Molybdenum(VI) complex with citric acid: synthesis and structural characterization of 1:1 ratio citrato molybdate K₂Na₄[(MoO₂)₂(cit)₂]·5H₂O. *Polyhedron*. 1997, 16, 75-79.
7. Zhang, R.; Zhou, X.; Guo, Y-C.; Chen, M.; Cao, Z.; Chow, Y.; Zhou, Z. Crystalline and solution chemistry of tetrameric and dimeric molybdenum(VI) citrato complexes. *Inorganica Chimica Acta*. 2013, 406, 27-36.
8. Bayot, D.; Tinant, B.; Devillers, M. Spectroscopic and structural characterizations of ammonium peroxy-carboxylato molybdate(VI) complexes. *Inorganica Chimica Acta*, 2004, 357, 809-816.

9. Harrison, C.; Li, X.; Hopkinson, I.; Stratford, S.; Guy, A.; Orpen, J. Ultraviolet-visible-near-infrared and EXAFS study of Coll coordination chemistry in post-doped silica sol-gel glasses. *Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions*. 1993, 89, 4115-4122.

Сведения об авторах:

Акимов Альберт Софронович – аспирант, младший научный сотрудник Института химии нефти Сибирского отделения Российской академии наук (Томск, Россия). E-mail: akimov149@yandex.ru

Журавков Сергей Петрович – кандидат химических наук, доцент Инженерной школы ядерных технологий Томского политехнического университета (Томск, Россия). E-mail: zhursp@yandex.ru

Акимов Аким Семенович – кандидат химических наук, старший научный сотрудник Института химии нефти Сибирского отделения Российской академии наук (Томск, Россия). E-mail: zerobox70@mail.ru

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Akimov Albert S. – Graduate Student, Junior Research Assistant, Institute of Petroleum Chemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russian Federation). E-mail: akimov149@yandex.ru

Zhuravkov Sergey P. – PhD, Associate Professor, Engineering School of Nuclear Technologies, Tomsk Polytechnic University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: zhursp@yandex.ru

Akimov Akim S. – PhD, Senior Researcher, Institute of Petroleum Chemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russian Federation). E-mail: zerobox70@mail.ru

The authors declare no conflicts of interests.

*Статья поступила в редакцию 18.08.2024; принята к публикации 03.12.2025
The article was submitted 18.08.2024; accepted for publication 03.12.2025*