ФИЗИЧЕСКАЯ ХИМИЯ

Статья поступила в редакцию: 26.08.2026
Статья принята к публикации: 04.10.2026
Статья опубликована: 07.11.2026

УДК 544.723.5+549.67

DOI: 10.32743/UniChem.2026.149.11.23499

Инфракрасно-спектроскопическая характеристика гидротермально синтезированного цеолита NaL

Бахронов Хаёт Нурович
д-р хим. наук, проф.
Ташкентский университет информационных технологий им. Мухаммада аль-Хорезмий
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: baxronov@mail.ru

Джуманов Анвар Алишерович
преподаватель
Академический лицей при Ташкентском университете информационных технологий им. Мухаммада аль-Хорезми
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: jumanovanvar777@gmail.com

Собиржонова Сурайё Тохир кизи
базовый докторант
Наманганский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Наманган
E-mail: sobirjonovasurayyo59@gmail.com

Холмедов Хамид Махкамович
канд. физ.-мат. наук, доц., заведующий кафедрой физики, Ташкентский университет информационных технологий им. Мухаммада аль-Хорезмий
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: hxolmedov@mail.ru

Ахмедова Нодира Аминджановна
канд. физ.-мат. наук, доц.
Ташкентский университет информационных технологий им. Мухаммада аль-Хорезмий
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: nodiraxon2402@gmail.com

Холиков Камолиддин Абдиганиевич
д-р филос. (PhD) по техническим наукам, ст. преподаватель
Ташкентский университет информационных технологий им. Мухаммада аль-Хорезмий
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: xoliqov260887@gmail.com

Библиографическое описание: Инфракрасно-спектроскопическая характеристика гидротермально синтезированного цеолита NaL // Universum: химия и биология : электрон. научн. журн. Бахронов Х.Н. [и др.]. 2026. 11(149). URL: https://7universum.com/ru/nature/archive/item/23499

Infrared-spectroscopic characterization of hydrothermally synthesized NaL zeolite

Bakhronov Khayot
doctor of Chemical Sciences, Professor
Tashkent University of Information Technologies named after Muhammad al-Khwarizmi
Uzbekistan, Tashkent
Jumanov Anvar
teacher
at the Academic Lyceum under the Tashkent University of Information Technologies named after Muhammad al-Khwarizmi Tashkent, Uzbekistan
Sobirjonova Surayyo
Basic Doctoral Candidate of the Namangan State Technical University Namangan, Uzbekistan
Kholmedov Khamid
candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor
Head of Physics Department of Tashkent University of Information Technologies named after Muhammad al-Khwarizmi
Uzbekistan, Tashkent
Akhmedova Nodira
candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of Tashkent University of Information Technologies named after Muhammad Al-Khwarizmi
Uzbekistan, Tashkent
Kamoliddin Kholikov
doctor of Philosophy (PhD) in Technical Sciences, Senior Lecturer
Muhammad al-Khwarizmi Tashkent University of Information Technologies
Republic of Uzbekistan, Tashkent

Аннотация

В работе представлены результаты инфракрасно-спектроскопического исследования гидротермально синтезированного цеолита NaL, относящегося к структурному типу LTL. Цель исследования заключалась в идентификации основных полос поглощения, установлении их принадлежности к функциональным группам и характеристическим колебаниям алюмосиликатного каркаса синтезированного материала. Исследование проводили методом инфракрасной спектроскопии с Фурье-преобразованием в диапазоне волновых чисел 4000–400 $см^{-1}$. В ИК-спектре образца идентифицировано девять полос поглощения. Широкая полоса при 3422,74 $см^{-1}$ и полоса при 1644,57 $см^{-1}$ отнесены соответственно к валентным колебаниям O–H гидроксильных групп и адсорбированной воды и деформационным колебаниям H–O–H. Наиболее интенсивная полоса при 999,95 $см^{-1}$ соответствует асимметричным валентным колебаниям связей T–O–T (T=Si, Al) алюмосиликатного каркаса. Полоса при 665,16 $см^{-1}$ связана с симметричными валентными колебаниями T–O–T, а полоса при 553,44 $см^{-1}$ отнесена к колебаниям двойных колец (D6R) вторичных структурных единиц. Деформационные колебания связей T–O проявляются при 464,91 $см^{-1}$. Дополнительно обнаружены слабые полосы при 2926,43, 2855,14 и 1399,70 $см^{-1}$, не являющиеся диагностическими для алюмосиликатного каркаса. Совокупность установленных спектральных характеристик согласуется с формированием каркаса цеолита структурного типа LTL. Полученные результаты позволяют охарактеризовать основные

функциональные группы и особенности каркасных колебаний синтезированного цеолита NaL и могут служить основой для дальнейшего изучения его структурных, адсорбционных и ионообменных свойств.

Abstract

This study presents the results of an infrared spectroscopic investigation of hydrothermally synthesized NaL zeolite belonging to the LTL framework type. The aim of the study was to identify the main absorption bands and assign them to the corresponding functional groups and characteristic vibrations of the aluminosilicate framework of the synthesized material. The sample was investigated by Fourier-transform infrared (FTIR) spectroscopy over the wavenumber range of 4000–400 cm^{-1}. Nine absorption bands were identified in the FTIR spectrum. The broad band at 3422.74 cm^{-1} and the band at 1644.57 cm^{-1} were assigned to O–H stretching vibrations of hydroxyl groups and adsorbed water and to H–O–H bending vibrations, respectively. The most intense band at 999.95 cm^{-1} corresponds to the asymmetric stretching vibrations of T–O–T (T=Si, Al) bonds in the aluminosilicate framework. The band at 665.16 cm^{-1} was attributed to symmetric T–O–T stretching vibrations, whereas the band at 553.44 cm^{-1} was assigned to vibrations of double rings (D6R) representing secondary building units of the zeolite framework. The T–O bending vibrations were observed at 464.91 cm^{-1}. In addition, weak bands at 2926.43, 2855.14, and 1399.70 cm^{-1} were detected; these bands are not diagnostic of the aluminosilicate framework. The overall spectral characteristics are consistent with the formation of an LTL-type zeolite framework. The obtained results provide insight into the principal functional groups and framework vibrations of the synthesized NaL zeolite and may serve as a basis for further investigations of its structural, adsorption, and ion-exchange properties.

Ключевые слова: цеолит NaL, структура LTL, ИК-спектр, каркасные колебания, функциональные группы, тетраэдры SiO_4 и AlO_4.

Keywords: NaL zeolite, LTL structure, FTIR spectroscopy, framework vibrations, functional groups, SiO_4 and AlO_4 tetrahedra.

Введение

Цеолиты представляют собой кристаллические алюмосиликаты с упорядоченной микропористой структурой, образованной сочленёнными тетраэдрами SiO_4 и AlO_4. Среди структурных типов цеолитов особое место занимает цеолит NaL, относящийся к структурному семейству LTL, каркас которого образован системой одномерных гексагональных каналов диаметром около 0.71 нм. Такая структура делает цеолит NaL перспективным материалом для процессов селективной адсорбции молекул, каталитического превращения углеводородов и создания супрамолекулярных систем типа «гость-хозяин» [1, с. 68; 13, с. 1943; 15, с. 2606]. Помимо каталитических и оптических приложений, упорядоченная канальная структура и выраженная катион обменная способность делают цеолит NaL перспективным материалом для адсорбционного извлечения ионов тяжёлых металлов и радионуклидов из водных сред, а также для создания газ чувствительных сенсорных композитов на его основе [5, с. 101; 14, с. 52].

Синтез цеолита NaL, как правило, осуществляется гидротермальным методом с использованием силикатных и алюминатных прекурсоров в щелочной среде. В ходе гидротермальной кристаллизации формируется характерный каркас LTL, при этом контроль условий синтеза определяет фазовую чистоту, морфологию и размер получаемых кристаллов [14, с. 52; 6, с. 2742; 9, с. 1413; 11, с. 101326].

Инфракрасная Фурье-спектроскопия (ИК-Фурье) является одним из основных методов идентификации функциональных групп и каркасных колебаний синтетических цеолитов, позволяя установить наличие связей T-O-T (T=Si, Al), гидроксильных групп и адсорбированной воды, а также получить косвенную информацию о соотношении Si/Al в каркасе [5, с. 106683; 2, с. 4036].

Целью настоящей работы является анализ ИК-спектра гидротермально синтезированного цеолита NaL, идентификация основных полос поглощения и их отнесение к соответствующим функциональным группам и каркасным колебаниям.

Материалы и методы

Цеолит NaL получали методом гидротермальной кристаллизации из химически чистых исходных компонентов — алюмината натрия ($NaAlO_2$) и силиката натрия (Na_2SiO_3) [3, с. 436–443]. Состав реакционной смеси соответствовал следующему молярному соотношению:

$1Al_2O_3:2SiO_2:3Na_2O:60H_2O$

Для приготовления алюминатного раствора 1,35 г $NaAlO_2$ растворяли в 10 мл дистиллированной воды и перемешивали на магнитной мешалке при 50 °C в течение 1 часа до получения однородного раствора.

Отдельно готовили силикатный раствор. Для этого 1,7 мл жидкого стекла с плотностью ρ=1,18 г/мл, что соответствует приблизительно 2,0 г, добавляли к 10 мл дистиллированной воды и перемешивали на магнитной мешалке при 50 °C в течение 2 часов до образования однородного раствора.

На стадии формирования геля приготовленный силикатный раствор постепенно, по каплям, добавляли к алюминатному раствору при постоянном перемешивании. Полученную реакционную смесь выдерживали при непрерывном перемешивании на магнитной мешалке при 50 °C в течение 24 часов до образования однородного алюмосиликатного геля.

Сформированный гель переносили в автоклав с тефлоновым вкладышем и подвергали гидротермальной кристаллизации при 120 °C в течение суток (24 ч.).

После завершения кристаллизации твёрдую фазу отделяли фильтрованием и многократно промывали дистиллированной водой до достижения pH≈7. Полученный продукт высушивали при 110 °C в течение 6 часов, после чего подвергали термической обработке при 400 °C в течение 4 часов. В результате получали кристаллический цеолит NaL, который использовали для последующих структурных исследований.

ИК-спектроскопическое исследование синтезированного цеолита NaL проводили методом инфракрасной спектроскопии с Фурье-преобразованием на спектрометре ALPHA II FT-IR (Bruker, Германия) в диапазоне волновых чисел 4000–400 $см^{-1}$. Для регистрации ИК-спектра предварительно высушенный порошкообразный образец цеолита NaL помещали непосредственно на измерительную поверхность ATR-приставки и обеспечивали плотный

контакт образца с кристаллом. Полученный спектр обрабатывали путём определения положения полос поглощения и их отнесения к соответствующим функциональным группам и колебаниям алюмосиликатного каркаса на основании литературных данных [7, с. 110683; 8, с. 13200].

Результаты и обсуждение

Идентификация полос поглощения. На ИК-спектре синтезированного образца цеолита NaL (Рисунок 1) идентифицировано девять полос поглощения (Таблица 1), охватывающих область гидроксильных и каркасных колебаний.

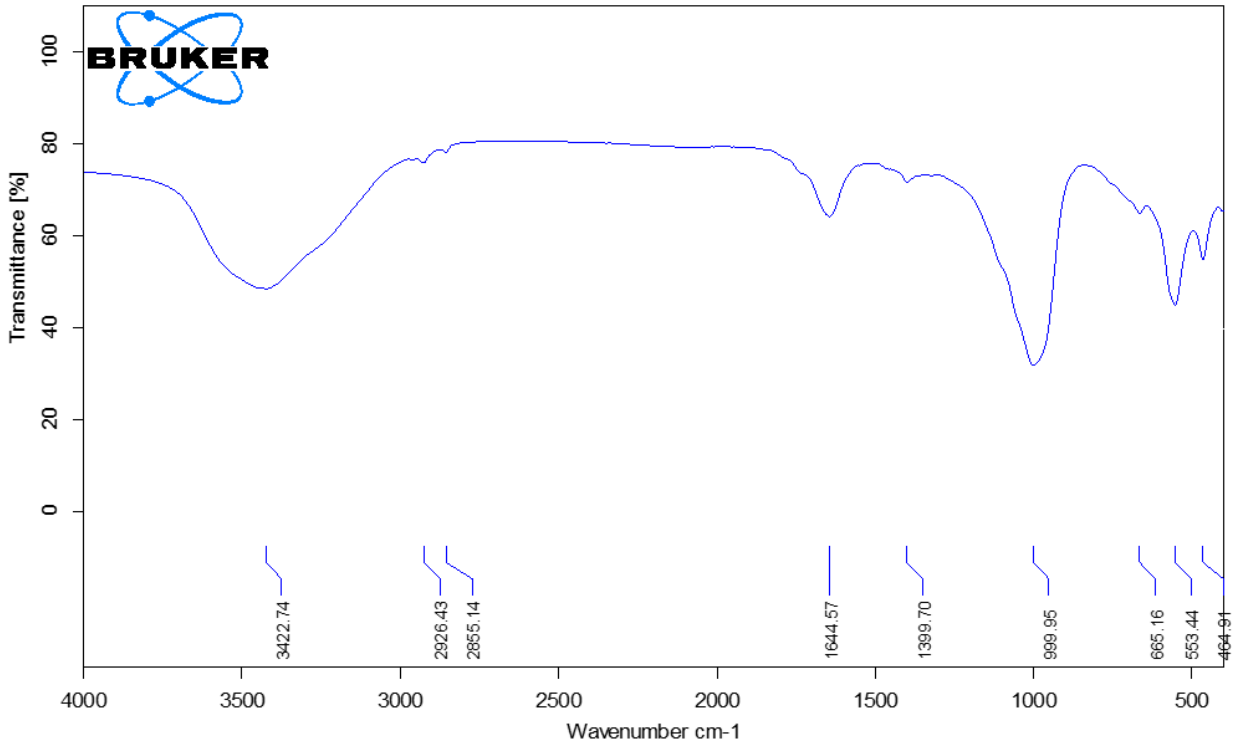


Рисунок 1. ИК-Фурье спектр синтезированного образца цеолита NaL

Таблица 1. Отнесение полос поглощения ИК-спектра цеолита NaL

№	ν, см$^{-1}$	Отнесение полосы поглощения
1	3422.74	ν(O-H) — валентные колебания гидроксильных групп/адсорбированной воды
2	2926.43	ν(C-H) — слабая, следовая полоса
3	2855.14	ν(C-H) — слабая, следовая полоса
4	1644.57	δ(H-O-H) — деформационные колебания адсорбированной воды
5	1399.70	слабая полоса, вероятно следовая
6	999.95	ν_{as}(T-O-T) — асимметричные валентные колебания каркаса (главная полоса)
7	665.16	ν_{s}(T-O-T) — симметричные валентные колебания каркаса
8	553.44	колебания двойных колец (D6R) вторичных структурных единиц
9	464.91	δ(T-O) — деформационные колебания связей T-O

Индивидуальное обсуждение полос поглощения. Полоса при 3422.74 $см^{-1}$ представляет собой широкую асимметричную полосу, обусловленную суперпозицией валентных колебаний O-H связей молекулярной воды, удерживаемой в каналах структуры LTL посредством водородных связей, а также поверхностных силанольных групп (Si-OH), локализованных на дефектах и внешней поверхности кристаллитов. Значительная ширина полосы отражает широкое распределение прочности водородных связей в гидратной оболочке катионов Na^+, компенсирующих отрицательный заряд каркаса [10, с. 176472, с. 4036].

В области 2926.43 $см^{-1}$ проявляется слабая полоса, соответствующая асимметричным валентным колебаниям C-H связей алифатических групп. Ввиду отсутствия органических структурообразующих агентов в составе синтезированного цеолита данная полоса, вероятнее всего, обусловлена следовой адсорбцией атмосферных углеводородов на поверхности образца и не имеет отношения к алюмосиликатному каркасу.

Сопутствующая ей полоса симметричных валентных колебаний C-H связей при 2855.14 $см^{-1}$ дополняет данную пару. Совместное появление этих полос типично для следовых алифатических примесей и подтверждает их неструктурное происхождение ввиду низкой интенсивности относительно каркасных полос. Деформационные колебания H-O-H молекул воды, физически адсорбированной в каналах структуры LTL, проявляются полосой при 1644.57 $см^{-1}$. Положение и интенсивность данной полосы традиционно используются как индикатор степени гидрофильности каркаса и содержания цеолитной воды; при термической дегидратации интенсивность данной полосы, как правило, существенно снижается [10, с. 176472].

Полоса низкой интенсивности при 1399.70 $см^{-1}$ характеризуется затруднённым точным отнесением. С учётом слабой выраженности она может быть связана либо с обертонными и составными колебаниями, либо со следовой адсорбцией атмосферного CO_2 в виде поверхностных карбонатных структур; ввиду низкой интенсивности данная полоса не является диагностической для идентификации каркаса.

Наиболее интенсивной полосой спектра является полоса при 999.95 $см^{-1}$, соответствующая асимметричным валентным колебаниям ν_{as}(T-O-T) внутренних тетраэдров [SiO_4] и [AlO_4], связанных через мостиковые атомы кислорода. Поскольку связи Al-O длиннее и слабее связей Si-O, увеличение содержания алюминия в каркасе закономерно смещает данную полосу в сторону меньших волновых чисел; согласно калибровочной зависимости, установленной для области 950 – 1090 $см^{-1}$, положение полосы при 999.95 $см^{-1}$ указывает на умеренное содержание алюминия в каркасе синтезированного цеолита LTL [14, с. 52; 11, с. 10132613]. Симметричные валентные колебания νs(T-O-T) проявляются полосой при 665.16 см-1, обусловленной синфазным смещением мостиковых атомов кислорода относительно тетраэдрических катионов. В отличие от асимметричной моды, данная полоса менее чувствительна к соотношению Si/Al и играет роль дополнительного, вспомогательного подтверждения целостности тетраэдрического каркаса [11, с. 10132613]. Колебаниям двойных колец (D6R) вторичных структурных единиц каркаса соответствует полоса при 553.44 $см^{-1}$. Согласно результатам DFT-расчётов колебательных мод кластерных моделей D6R с отношением Si/Al ≈ 5, данная полоса теоретически ожидается в диапазоне 570 – 600 $см^{-1}$ [14, с. 52]; каркас LTL, наряду с рядом других структурных типов, содержит D6R в качестве

вторичной структурной единицы, что делает данную полосу структурным отпечатком упорядоченной организации каркаса. Наблюдаемое незначительное смещение относительно теоретического диапазона может быть связано с иным распределением Si, Al в кольце и природой компенсирующего катиона [8, с. 13200]. Завершает набор каркасных полос деформационная полоса связей T-O при 464.91 $см^{-1}$, обусловленная угловыми искажениями отдельных тетраэдров [SiO_4] и [AlO_4]. Будучи характерной практически для всех алюмосиликатных каркасов независимо от структурного типа, данная полоса менее специфична для идентификации конкретной топологии, однако служит дополнительным подтверждением сохранности тетраэдрической координации катионов каркаса [11, с. 10132613]. Сопоставление с литературными данными. Совокупность идентифицированных полос поглощения — широкая полоса O-H, полоса деформационных колебаний воды, а также набор каркасных полос в области 1000–450 $см^{-1}$ — согласуется с данными, представленными в работах, посвящённых синтезу и ИК-спектроскопической характеристике различных типов цеолитов, включая структурный тип LTL [5, с. 101; 14, с. 52; 4, с. 122; 6, с. 2742; 9, с. 1413; 11, с. 101326, 12, с. 1, 16, с. 341]. Положение и относительное распределение полос асимметричных и симметричных валентных колебаний, а также полосы двойных колец, хорошо соответствуют типичным диапазонам, приводимым для алюмосиликатных цеолитных каркасов [11, с. 101326]. Это подтверждает успешное формирование кристаллического каркаса LTL в результате применённого гидротермального метода синтеза.

Заключение

Методом ИК-Фурье спектроскопии установлено, что гидротермально синтезированный образец цеолита NaL характеризуется набором полос поглощения, типичных для структурного типа LTL. Широкая полоса при 3422.74 см-1 и полоса при 1644.57 см-1 отнесены к гидроксильным группам и адсорбированной воде, тогда как полосы при 999.95, 665.16, 553.44 и 464.91 см-1 соответствуют каркасным колебаниям связей T-O-T и вторичных структурных единиц. Положение главной полосы асимметричных валентных колебаний (999.95 $см^{-1}$) указывает на умеренное содержание алюминия в каркасе, характерное для цеолита LTL. Полученные результаты подтверждают эффективность применённого гидротермального метода синтеза для получения цеолита NaL с хорошо сформированной каркасной структурой и создают основу для дальнейших исследований его текстурных, адсорбционных и ионообменных свойств.

Список литературы

1. Ivanova I., Ponomareva O., Andriyako E., Nesterenko N. Innovations in Zeolite Catalysis // Energy Policy. – 2021. – № 6. – P. 68–79.
2. Alotaibi A.M. An overview of zeolites: from historical background to diverse applications // Molecules. – 2025. – T. 30. – Art. 4036. – DOI: 10.3390/molecules30204036.
3. Bakhronov Kh., Jumanov A., Sobirjonova S., Giyosova R. Hydrothermal synthesis and XRD characterization of NaL zeolite with ltl framework // Scientific and Technical Journal of NamIET. – 2025. – T. 10. – P. 436–443.

4. Bello M.O. Abdus-Salam N., Adekola F.A., Oyewumi-Musa R.T., Pal U. Synthesis and characterization of zeolite Y from agricultural and municipal wastes: a waste management approach // Waste Management Bulletin. – 2024. – T. 2. – P. 122–129.
5. Dandotia A., Tomar S.S., Dipak P., Tiwari R.K. Studies on the synthesis and characterization of zeolite-LTL/PPy composite for gas sensing application // Bulletin of Materials Science. – 2022. – T. 45. – Art. 101. – DOI: 10.1007/s12034-022-02674-9.
6. Lach M., Grela A., Komar N. et al. Calcined post-production waste as materials suitable for the hydrothermal synthesis of zeolites // Materials. – 2019. – T. 12. – Art. 2742. – DOI: 10.3390/ma12172742.
7. Ma Y.-K., Rigolet S., Michelin L., Paillaud J.-L., Mintova S., Khoerunnisa F., Daou T.J., Ng E.-P. Facile and fast determination of Si/Al ratio of zeolites using FTIR spectroscopy technique // Microporous and Mesoporous Materials. – 2021. – T. 311. – Art. 110683. – DOI: 10.1016/j.micromeso.2020.110683.
8. Mikosch H., Uzunova E.L., Nikolov G.St. Vibrational modes of double six-member rings of oxygen-bridged silicon and aluminum atoms in zeolites: a DFT study // The Journal of Physical Chemistry B. – 2004. – T. 108. – P. 13200–13207. – DOI: 10.1021/jp0486189.
9. Panek R., Madej J., Bandura L. et al. Recycling of waste solution after hydrothermal conversion of fly ash on a semi-technical scale for zeolite synthesis // Materials. – 2021. – T. 14. – Art. 1413. – DOI: 10.3390/ma14061413.
10. Pérez-Botella E., Valencia S., Rey F. Pérez-Botella E., Valencia S., Rey F. Zeolites in adsorption processes: state of the art and future prospects // Chemical Reviews. – 2022. – T. 122. – P. 17647–17695. – DOI: 10.1021/acs.chemrev.2c00140.
11. Ristić A. Ristić A., et al. Recent progress in zeolite X synthesis from industrial waste // Chemical Engineering Journal Advances. – 2026. – T. 27. – Art. 101326. – DOI: 10.1016/j.ceja.2026.101326.
12. Shin S., Kim M.-J. Hydrothermal synthesis of zeolites from residual waste generated via indirect carbonation of coal fly ash // Sustainable Environment Research. – 2024. – T. 34. – P. 1–8. – DOI: 10.1186/s42834-023-00206-6.
13. Su X., Zan W., Bai X., Wang G., Wu W. Synthesis of microscale and nanoscale ZSM-5 zeolites: effect of particle size and acidity of Zn modified ZSM-5 zeolites on aromatization performance // Catalysis Science & Technology. – 1952. – T. 7. – P. 1943–1952.
14. Ye Z., Kong L., Zhao Y. et al. Alkalinity-controlled zeolite nucleation and growth: ultrafast synthesis of total-morphology zeolite L mesocrystals and adsorption evaluation // Chemical Synthesis. – 2022. – T. 2. – P. 52–72.
15. Zeng C., Hu Q. Zeolite catalysts in industrial processes // Chinese Journal of Chemical Engineering. – 2019. – T. 27. – P. 2606–2614.
16. Zhu T., Zhang X., Han Y., Liu T., Wang B., Zhang Z. Preparation of zeolite X by the aluminum residue from coal fly ash for the adsorption of volatile organic compounds // Frontiers in Chemistry. – 2019. – T. 7. – Art. 341. – DOI: 10.3389/fchem.2019.00341.