

ХИМИЯ
CHEMISTRY

УДК 541.182

<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-5-544-550>

Поступило в редакцию 20.04.2020

Received 20.04.2020

**Т. Ф. Кузнецова¹, академик В. Е. Агабеков², А. И. Иванец¹,
Е. В. Карпинчик², Ю. Д. Саука¹**

¹*Институт общей и неорганической химии Национальной академии наук Беларуси,
Минск, Республика Беларусь*

²*Институт химии новых материалов Национальной академии наук Беларуси,
Минск, Республика Беларусь*

**ПОЛУЧЕНИЕ МЕЗОПОРИСТОГО КРЕМНЕЗЕМА
С УПОРЯДОЧЕННОЙ НАНОСТРУКТУРНОЙ МОРФОЛОГИЕЙ
ИЗ ПРИРОДНОГО КВАРЦЕВОГО ПЕСКА**

Аннотация. Из природного кварцевого песка получен кремнезем с упорядоченной наноструктурной морфологией, характерной для мезопористых молекулярных сит с кубической упаковкой цилиндрических пор и трехмерной пористой структурой. Методами рентгеновской дифракции, сканирующей электронной микроскопии и низкотемпературной адсорбции-десорбции азота показано, что полученный кремнеземный материал термически стабилен, аморфен, состоит из зерен субмикронного размера, обладает высокой удельной поверхностью 1396 м²/г, объемом пор 0,780 см³/г и средним диаметром 2,2 нм с узким распределением мезопор по размеру.

Ключевые слова: кремнезем, кварц, темплатный метод, мезопористое молекулярное сито, адсорбция

Для цитирования. Получение мезопористого кремнезема с упорядоченной наноструктурной морфологией из природного кварцевого песка / Т. Ф. Кузнецова [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2020. – Т. 64, № 5. – С. 544–550. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-5-544-550>

**Tatyana F. Kouznetsova¹, Academician Vladimir E. Agabekov², Andrei I. Ivanets¹,
Evgeny V. Karpinchik², Justyna D. Sauka¹**

¹*Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus,
Minsk, Republic of Belarus*

²*Institute of Chemistry of New Materials of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus*

**SYNTHESIS OF MESOPOROUS SILICA WITH ORDERED NANOSTRUCTURAL
MORPHOLOGY FROM NATURAL QUARTZ SAND**

Abstract. Silica with ordered nanostructured morphology characteristic of mesoporous molecular sieves with cubic packing of cylindrical pores and a three-dimensional porous structure is obtained from natural quartz sand. It was shown by X-ray diffraction, scanning electron microscopy, and low-temperature nitrogen adsorption-desorption that the obtained silica material is thermally stable, amorphous, consists of submicron grains, has a high specific surface area of 1396 m²/g, a pore volume of 0.780 cm³/g and an average diameter of 2.2 nm with a narrow size distribution of mesopores.

Keywords: silica, quartz, template method, mesoporous molecular sieve, adsorption

For citation: Kouznetsova T. F., Agabekov V. E., Ivanets A. I., Karpinchik E. V., Sauka J. D. Synthesis of mesoporous silica with ordered nanostructural morphology from natural quartz sand. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2020, vol. 64, no. 5, pp. 544–550 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-5-544-550>

Введение. Открытие темплатного синтеза аморфных кремнеземных нанопористых материалов типа MCM-41 и SBA-15 (акронимы от англ. Mobil Composition of Matter и Santa Barbara Acids), относящихся к классу мезопористых молекулярных сит, благодаря их упорядоченной наноструктурной морфологии, точному контролю размера мезопор, стабильности, доступности и функциона-

лизации кремнеземной поверхности [1–4] вызвало огромный интерес к ним в связи с возможностью применения в катализе, сепарационных и адсорбционных процессах, доставке лекарств, хранении газа, а также в нанокompозитах и электронных устройствах. Наличие у мезопористых молекулярных сит цилиндрических мезопор во многом способствует решению проблемы диффузии, ограничивающей производительность микропористых цеолитов в каталитических процессах. Мезопоры с диаметром от 2 до 50 нм в сравнении с микропорами диаметром не более 2 нм обеспечивают на порядки более быстрый массоперенос и могут рассматриваться как своеобразные «молекулярные магистрали» [5].

Массоперенос в микропорах цеолита или похожих материалах обычно осуществляется в конфигурационном диффузионном режиме по молекулярно-ситовому механизму [5]. Конфигурационная диффузия «гостевых» молекул в микропорах очень мала, зависит от размера и формы молекул, концентрации вещества и характеризуется высокой энергией активации (до 100 кДж/моль). Коэффициент конфигурационной диффузии составляет около 10^{-12} – 10^{-18} м²/с, что примерно на 10 порядков ниже коэффициента кнудсеновской диффузии, в которой частота столкновений молекул газа со стенками пор превышает частоту взаимных столкновений молекул. Считается, что данный вид диффузии осуществляется при диаметре пор от 2 до 50 нм [5]. В макропорах с диаметром более 50 нм преобладает молекулярная диффузия [5], и столкновения между молекулами обычно происходят гораздо чаще, чем столкновения со стенками пор. При уменьшении размера макропор до мезопор количество столкновений молекул со стенками увеличивается, диффузия Кнудсена начинает превалировать. При размере пор менее 2 нм молекулы в основном взаимодействуют с поверхностью, и вследствие ограничения диффузии только часть цеолита оказывается каталитически эффективной.

Согласно [5; 6], эффективность использования катализатора задается фактором эффективности η :

$$\eta = th\Phi / \Phi, \quad (1)$$

где Φ – модуль Тиле, являющийся количественной мерой влияния массопереноса в порах катализатора для реакции первого порядка

$$\Phi = L(k / RD_e)^{1/2}, \quad (2)$$

где L – длина диффузионного пути; k – константа скорости реакции; R – средний радиус поры; D_e – коэффициент эффективной диффузии.

Согласно (1) и (2), высокий модуль Тиле ($\Phi \rightarrow \infty$, $\eta \rightarrow 1 / \Phi$) при больших значениях константы скорости или глубины поры, малых коэффициентах диффузии или радиусах пор свидетельствует о низкой эффективности катализатора и чем меньше Φ ($\Phi \rightarrow 0$, $\eta \rightarrow 1$), тем она выше. При больших значениях Φ основная часть реагента расходуется на начальном участке поры. Поскольку в глубину микропоры реагент практически не поступает, то часть активных центров остается для него не доступной. Таким образом, диффузия исходного вещества является лимитирующей стадией. Согласно представлениям о применимости модуля Тиле (Φ) и фактора эффективности (η) для цеолитных катализаторов [6; 7], в отсутствие диффузионного ограничения и при полном использовании каталитического потенциала фактор эффективности $\eta = 1$. Если коэффициент $\eta < 1$ и равен, например 0,25, то лишь четверть объема катализатора эффективна.

Транспортные ограничения отрицательно влияют не только на активность и селективность катализатора, но и сокращают срок его службы. В соответствии с (2) стратегия повышения каталитической эффективности в реакционной системе при постоянном значении константы k заключается либо в сокращении диффузионного пути L , либо в повышении эффективности диффузии D_e в порах, что может быть реализовано при использовании мезопористых молекулярных сит.

Однако в случае применения мезопористых молекулярных сит каталитические превращения молекул реагентов могут сдерживаться низкой кислотностью и недостаточной гидротермальной стабильностью таких кремнеземных материалов, обусловленными их аморфной природой. Различия в свойствах мезопористых молекулярных сит и типичных кристаллических микропористых цеолитов [8] проявляются, в частности, в том, что кислотность Бренстеда у мезопористых

молекулярных сит либо незначительна, либо вообще отсутствует. Поэтому они мало эффективны в качестве катализаторов в таких реакциях, как крекинг, изомеризация и гидроизомеризация, алкилирование, этерификация и др. В ряде технологий гетерогенные цеолитные катализаторы с сильной брэнстедовской кислотностью успешно заменяют гомогенные, применение которых зачастую нетехнологично. Очевидно, что для каталитических превращений в промышленных технологиях экономически выгодными будут даже небольшие технологические усовершенствования при использовании улучшенных катализаторов типа мезопористых молекулярных сит.

Образование в кремнеземах мезопор с упорядоченной наноструктурной морфологией возможно при использовании супрамолекулярного коллоидного темплата (обычно сурфактант в мицеллярной форме), вокруг которого формируется оксидный каркас. Из-за взаимодействия анионной решетки SiO_2 и катионного темплата последний оказывается «запертым» в формирующемся силикатном каркасе, который в результате отражает геометрию органических молекул [1–4]. Происходящий рост неорганических или гибридных сетей на основе мицеллярных агрегатов сурфактанта приводит к созданию нового типа мезопористых материалов с размерами пор от 2 до 100 нм [9–14].

Новые мезопористые материалы, объединяющие кремнеземы типа MCM-41 и SBA-15 с гексагональной упаковкой цилиндрических пор или MCM-48, MCM-50 и другие с кубической и пластинчатой упаковкой, обладают высокими значениями удельной поверхности $>1000 \text{ м}^2/\text{г}$ и объема пор $\approx 1,0 \text{ см}^3/\text{г}$ с узким распределением по размерам аналогично классическим кристаллическим цеолитам, но с преобладающим размером пор от 2 до 50 нм [1–4]. Кубическая структура MCM-48 индексируется в пространственной группе $Ia3d$. Среди преимуществ кремнезема MCM-48 по сравнению с другими представителями класса мезопористых молекулярных сит – его достаточно высокая термостабильность, возможность регулирования каталитических свойств путем внедрения различных металлов в стенки анионного каркаса (Ti, Zr, Al, V, Cr и др.), а также однородность частиц субмикронного размера с узким распределением пор [13]. В отличие от MCM-41 геометрическая структура MCM-48 более развита, что улучшает массоперенос в процессах катализа, адсорбции и сепарации.

Цель настоящей работы – низкотемпературный синтез мезопористого молекулярного сита типа MCM-48 из природного кварцевого песка.

Материалы и методы исследования. Мезопористый материал с типом морфологии MCM-48, являющийся по химическому составу оксидом кремния (IV), получали осаждением SiO_2 на супрамолекулярном коллоидном темплате (хлориде цетилпиридиния). В качестве источника кремния (IV) использовали водный раствор метасиликата натрия (силикатный модуль $\text{SiO}_2 : \text{Na}_2\text{O} = 1$, концентрация SiO_2 5,5 мас. %), который получали спеканием природного кварца с карбонатом натрия при температуре 1300 °С. Общая схема синтеза включала подготовку и смешение растворов, осаждение дисперсной системы, старение и промывку осадка, его высушивание и прокаливание при 650 °С. Для нейтрализации гидроксида натрия применяли 35 %-ную серную кислоту.

Адсорбционные и текстурные свойства полученного кремнеземного образца оценивали из изотермы низкотемпературной (–196 °С) физической адсорбции-десорбции азота, измеренной объемным методом на анализаторе ASAP 2020 MP (США). Распределение пор по размерам рассчитывали методом NLDFT (Non-Local Density Functional Theory), удельную поверхность образцов (A_{BET}) – стандартным методом BET (Brunauer–Emmett–Teller) в интервале относительных давлений $p/p_0 = 0,05–0,30$, внешнюю поверхность (A_{ext}) – сравнительным t -методом, общий объем пор – методом Гурвича при $p/p_0 = 0,985$.

Среднюю статистическую толщину (t) адсорбционной пленки вычисляли по уравнению Гаркинса–Юры [5]

$$t = (n / n_m)\sigma,$$

где n / n_m – число статистических монослоев в пленке; σ – толщина одного слоя в предположении плотнейшей гексагональной упаковки молекул азота в адсорбционной пленке при –196 °С.

Анализируемую изотерму перестраивали в t -график в виде функции $n = f(t)$:

$$n = b_1 t + b,$$

где b_t – тангенс угла наклона t -графика, равный n_m / σ ; b – отрезок, отсекаемый t -графиком на оси ординат при экстраполяции.

Площадь внешней поверхности, определенная t -методом, составляет, согласно [5],

$$A_{\text{ext}} = b_t V_L,$$

где V_L – молярный объем азота при -196 °С.

Если значение площади внешней поверхности A_{ext} превышает значение величины A_{BET} , то микропоры и соответственно их объем и площадь поверхности в образце фактически отсутствуют. Это связано с тем, что удельную поверхность микропор (A_{micro}) рассчитывают как разность величин A_{BET} и внешней площади поверхности A_{ext} , вычисленной t -методом, когда $A_{\text{BET}} > A_{\text{ext}}$ [5]:

$$A_{\text{micro}} = A_{\text{BET}} - A_{\text{ext}}.$$

Рентгенофазовый анализ образца SiO_2 проводили на дифрактометре ДРОН-3 с использованием фильтрованного CuK_α -излучения ($\lambda = 0,15418$ нм), регистрируя рефлексы в области малых углов, характерных для упорядоченных структур типа мезопористых молекулярных сит. Морфологию поверхности изучали с помощью растрового электронного микроскопа марки LEO 1455VP фирмы «Карл Цейсс».

Результаты и их обсуждение. Линейная изотерма низкотемпературной адсорбции-десорбции азота, согласно IUPAC [10], относится к изотермам типа IV, которые обычно характерны для мезопористых адсорбентов, в том числе промышленных, многих оксидных гелей и мезопористых молекулярных сит, а ее форма аналогична для мезопористого молекулярного сита MCM-48 (рис. 1).

Адсорбционное поведение азота в мезопорах определяется взаимодействиями адсорбент-адсорбтив и взаимодействиями молекул в конденсированном состоянии. При этом начальная моно- и полимолекулярная адсорбция на стенках мезопор проходит по тому же пути, что и в соответствующей части изотермы типа II, характерной для непористых и макропористых адсорбентов, но сопровождается поровой конденсацией [10]. Последняя представляет собой явление, когда газ конденсируется в жидкоподобную фазу в поре при давлении p , меньшем, чем давление насыщенного пара p_0 . Типичной особенностью изотерм типа IV является наличие плато насыщения. В случае изотермы типа IVa капиллярная конденсация сопровождается гистерезисом. Это происходит, если диаметр пор превышает определенное критическое значение, зависящее от адсорбционной системы и температуры, например, для адсорбции азота в цилиндрических порах при -196 °С гистерезис возникает в порах, диаметр которых >4 нм. На адсорбентах, имеющих мезопоры меньшего диаметра, наблюдаются полностью обратимые изотермы типа IVb. Таким образом, изотерма, приведенная на рис. 1, может быть идентифицирована как практически обратимая изотерма типа IVb без явного капиллярно-конденсационного гистерезиса, что характерно для мезопористых адсорбентов с диаметрами пор меньше 4 нм.

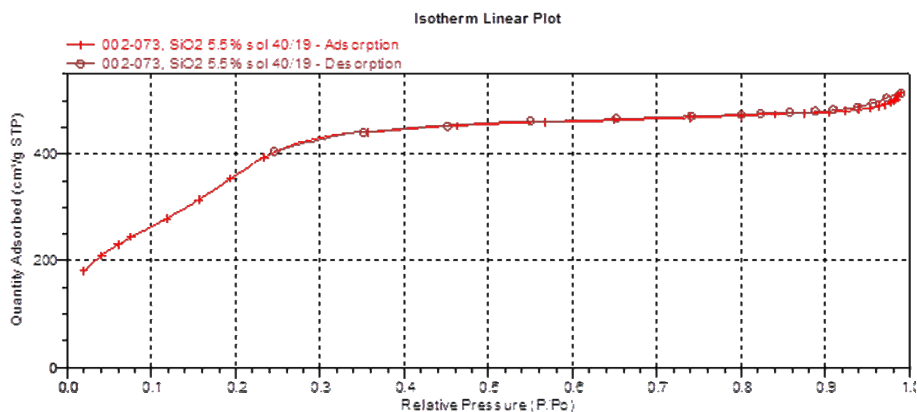


Рис. 1. Изотерма низкотемпературной адсорбции-десорбции азота на полученном образце типа MCM-48

Fig. 1. Isotherms of low-temperature nitrogen adsorption-desorption by of the obtained sample of the MCM-48 type

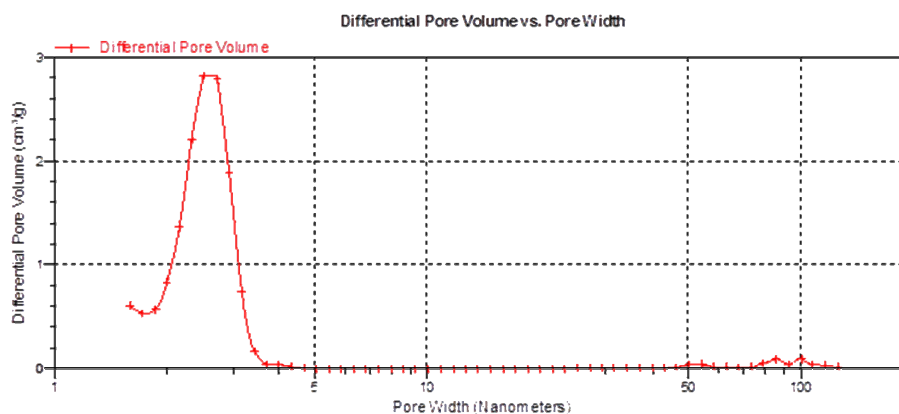


Рис. 2. NLDFT-распределение пор по размеру для полученного образца типа MCM-48

Fig. 2. The NLDFT pore size distribution of the obtained sample

Характерный для MCM-48 резкий подъем сорбции проявляется при значении относительного давления $p/p_0 = 0,2-0,3$. Удельная поверхность, по BET, составляет $1396 \text{ м}^2/\text{г}$, средний диаметр пор – $2,2 \text{ нм}$, объем пор, по Гурвичу, – $0,780 \text{ см}^3/\text{г}$. Внешняя поверхность $A_{\text{ext}} = 2291 \text{ м}^2/\text{г}$, согласно t -методу, и, поскольку $A_{\text{BET}} < A_{\text{ext}}$, микропоры в полученном образце отсутствуют. В соответствии с NLDFT-кривой и формальными расчетами, по ВЖН (метод Barrett–Joyner–Halenda), средний диаметр пор находится в узком диапазоне $2-3 \text{ нм}$ (рис. 2).

Анализ дифрактограммы кремнезема, измеренной в области малых брэгговских углов, дает возможность по наиболее интенсивному рефлексу $d_{211} = 3,31 \text{ нм}$ [50–511 в картотеке ASTM] идентифицировать мезопористое молекулярное сито MCM-48 с трехмерной кубической биконтинуальной пористой структурой (рис. 3).

СЭМ-изображение полученного образца MCM-48 (рис. 4) свидетельствует о формировании достаточно однородной мезофазы с субмикронными (около $0,3-0,4 \text{ мкм}$) агломератами частиц шарообразной формы.

Стенки пор упорядоченных кремнезёмов, синтезированных на катионных поверхностно-активных темплатах, аморфны и по толщине равны $\approx 1 \text{ нм}$ [4]. В относительно жестких условиях высоких температур и давлений тонкие аморфные стенки ограничивают гидротермальную стабильность мезопористых молекулярных сит в отличие от кристаллических цеолитных структур. Тем не менее, достаточно устойчивые структуры с улучшенной гидротермальной стабильностью,

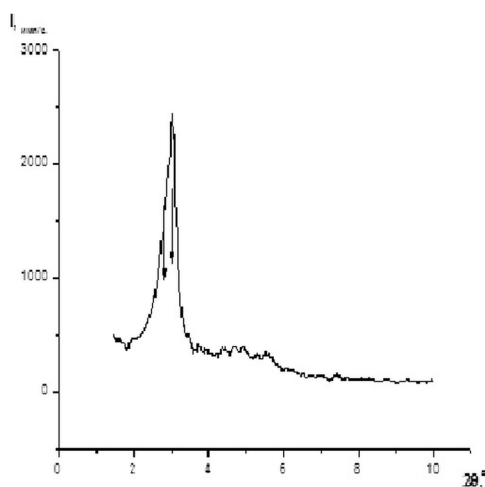


Рис. 3. Дифрактограмма полученного образца типа MCM-48

Fig. 3. X-ray diffraction pattern of the obtained sample of the MCM-48 type

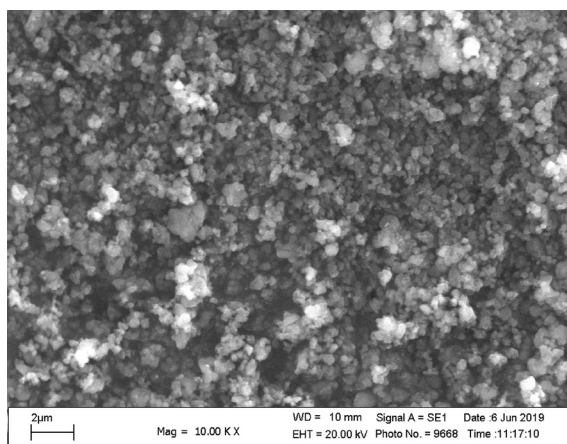


Рис. 4. СЭМ-изображение полученного образца типа MCM-48

Fig. 4. SEM-pattern of the obtained sample of the MCM-48 type

как показано в [6] и в настоящей работе, могут быть получены за счет повышения температуры и продолжительности синтеза или изменения концентрации темплата. Например, темплатный синтез мезопористых молекулярных сит с молярным отношением кремнезема к темплату, равным 5 : 1 и выше, приводит к мезопористому молекулярному ситу МСМ-41, тогда как МСМ-48 получают при соотношении 3,5 : 1 [9; 15].

Заключение. Преимуществами разработанного метода синтеза кремнезема с упорядоченной мезопористой структурой типа МСМ-48 являются исключение стадии гидротермальной обработки, осаждение при комнатной температуре и атмосферном давлении, оптимальный выбор молярного соотношения кремнезема и темплата, а также диапазона значений рН, времени и температуры синтеза.

Полученный кремнеземный материал аморфен, термически стабилен, состоит из зерен субмикронного размера (около 0,3–0,4 мкм), обладает высокой удельной поверхностью по ВЕТ (1396 м²/г), большим объемом пор (0,780 см³/г), средним их диаметром (2,2 нм) и узким распределением мезопор по размеру. Кремнезем МСМ-48 представляет собой однородно мезопористый материал класса мезопористых молекулярных сит с кубической упаковкой цилиндрических пор и трехмерной пористой структурой. Материал МСМ-48 перспективен как катализатор и носитель в различных каталитических приложениях, а также в процессах сепарации и адсорбции. Благодаря своим пористым и морфологическим характеристикам он может быть использован также в качестве стационарных фаз для жидкостной хроматографии, подложек для иммобилизации биомолекул и катализаторов, твердых матриц для получения мезопористого углерода и агента для армирования полимеров.

Список использованных источников

1. Ordered mesoporous molecular sieves synthesized by a liquid-crystal template mechanism / C. T. Kresge [et al.] // *Nature*. – 1992. – Vol. 359, N 6397. – P. 710–712. <https://doi.org/10.1038/359710a0>
2. Triblock Copolymer Syntheses of Mesoporous Silica with Periodic 50 to 300 Angstrom Pores / D. Zhao [et al.] // *Science*. – 1998. – Vol. 279, N 5350. – P. 548–552. <https://doi.org/10.1126/science.279.5350.548>
3. Inagaki, S. Synthesis of highly ordered mesoporous materials from a layered polysilicate / S. Inagaki, Y. Fukushima, K. Kuroda // *Journal of the Chemical Society, Chemical Communications*. – 1993. – N 8. – P. 680–682. <https://doi.org/10.1039/c39930000680>
4. The discovery of ExxonMobil's M41S family of mesoporous molecular sieves / C. T. Kresge [et al.] // *Studies in Surface Science and Catalysis*. – 2004. – Vol. 148. – P. 53–72. [https://doi.org/10.1016/s0167-2991\(04\)80193-9](https://doi.org/10.1016/s0167-2991(04)80193-9)
5. Roque-Malherbe, R. M. A. Adsorption and Diffusion in Nanoporous Materials / R. M. A. Roque-Malherbe. – Boca Raton, 2007. – 269 p. <https://doi.org/10.1201/9781420046762>
6. Kollár, M. Silica and aluminosilicate catalysts of hierarchical porous structure / M. Kollár, M. R. Mihályi, J. Valyon // *Silica and Silicates in Modern Catalysis* / ed. I. Halasz. – 2010. – P. 171–185.
7. Baur, R. The effectiveness factor for zeolite catalysed reactions / R. Baur, R. Krishna // *Catalysis Today*. – 2005. – Vol. 105, N 1. – P. 173–179. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2005.04.007>
8. Taguchi, A. Ordered mesoporous materials in catalysis / A. Taguchi, F. Schüth // *Microporous and Mesoporous Materials*. – 2005. – Vol. 77, N 1. – P. 1–45. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2004.06.030>
9. Roth, W. J. The effect of stoichiometry and synthesis conditions on the properties of mesoporous M41S family silicates / W. J. Roth, J. C. Vartuli // *Studies in Surface Science and Catalysis*. – 2001. – Vol. 135. – P. 134. [https://doi.org/10.1016/s0167-2991\(01\)81197-6](https://doi.org/10.1016/s0167-2991(01)81197-6)
10. Physisorption of Gases, with Special Reference to the Evaluation of Surface Area and Pore Size Distribution (IUPAC Technical Report) / M. Thommes [et al.] // *Pure and Applied Chemistry*. – 2015. – Vol. 87, N 9–10. – P. 1051–1069. <https://doi.org/10.1515/pac-2014-1117>
11. Mesotunnels on the Silica Wall of Ordered SBA-15 to Generate Three-Dimensional Large-Pore Mesoporous Networks / J. Fan [et al.] // *J. Am. Chem. Soc.* – 2001. – Vol. 123, N 48. – P. 12113–12114. <https://doi.org/10.1021/ja011564i>
12. Dilute Solution Routes to Various Controllable Morphologies of MCM-41 Silica with a Basic Medium / Q. Cai [et al.] // *Chem. Mater.* – 2001. – Vol. 13, N 2. – P. 258–263. <https://doi.org/10.1021/cm990661z>
13. Widenmeyer, M. Pore Size Control of Highly Ordered Mesoporous Silica MCM-48 / M. Widenmeyer, R. Anwänder // *Chem. Mater.* – 2002. – Vol. 14, N 4. – P. 1827–1831. <https://doi.org/10.1021/cm011273b>
14. Pantazis, C. C. Highly Loaded and Thermally Stable Cu-Containing Mesoporous Silica – Active Catalyst for the NO + CO Reaction / C. C. Pantazis, P. N. Trikalitis, P. J. Pomonis // *J. Phys. Chem. B*. – 2005. – Vol. 109, N 25. – P. 12574–12581. <https://doi.org/10.1021/jp0516689>
15. Kuznetsova, T. F. The Adsorptive Properties of Titanosilicate Xerogels and Membranes of Identical Genesis / T. F. Kuznetsova, Yu. D. Sauka, A. I. Ivanets // *Biocompatible Hybrid Oxide Nanoparticles for Human Health* / eds. I. Melnyk [et al.]. – Netherlands, 2019. – P. 3–14. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-815875-3.00001-1>

References

1. Kresge C. T., Leonowicz M. E., Roth W. J., Vartuli J. C., Beck J. S. Ordered mesoporous molecular sieves synthesized by a liquid-crystal template mechanism. *Nature*, 1992, vol. 359, no. 6397, pp. 710–712. <https://doi.org/10.1038/359710a0>
2. Zhao D., Feng J., Huo Q., Melosh N., Frederickson G. H., Chmelka B. F., Stucky G. D. Triblock Copolymer Syntheses of Mesoporous Silica with Periodic 50 to 300 Angstrom Pores. *Science*, 1998, vol. 279, no. 5350, pp. 548–552. <https://doi.org/10.1126/science.279.5350.548>
3. Inagaki S., Fukushima Y., Kuroda K. Synthesis of highly ordered mesoporous materials from a layered polysilicate. *Journal of the Chemical Society, Chemical Communications*, 1993, no. 8, pp. 680–682. <https://doi.org/10.1039/c39930000680>
4. Kresge C. T., Vartuli J. C., Roth W. J., Leonowicz M. E. The discovery of ExxonMobil's M41S family of mesoporous molecular sieves. *Studies in Surface Science and Catalysis*, 2004, vol. 148, pp. 53–72. [https://doi.org/10.1016/s0167-2991\(04\)80193-9](https://doi.org/10.1016/s0167-2991(04)80193-9)
5. Roque-Malherbe R. M. A. Adsorption and Diffusion in Nanoporous Materials. Boca Raton, 2007. 269 p. <https://doi.org/10.1201/9781420046762>
6. Kollár M., Mihályi M. R., Valyon J. Silica and aluminosilicate catalysts of hierarchical porous structure. Halasz I., ed. *Silica and Silicates in Modern Catalysis*. 2010, pp. 171–185.
7. Baur R., Krishna R. The effectiveness factor for zeolite catalysed reactions. *Catalysis Today*, 2005, vol. 105, no. 1, pp. 173–179. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2005.04.007>
8. Taguchi A., Schüth F. Ordered mesoporous materials in catalysis. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2005, vol. 77, no. 1, pp. 1–45. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2004.06.030>
9. Roth W. J., Vartuli J. C. The effect of stoichiometry and synthesis conditions on the properties of mesoporous M41S family silicates. *Studies in Surface Science and Catalysis*, 2001, vol. 135, p. 134. [https://doi.org/10.1016/s0167-2991\(01\)81197-6](https://doi.org/10.1016/s0167-2991(01)81197-6)
10. Thommes M., Kaneko K., Neimark A. V., Olivier J. P., Rodriguez-Reinoso F., Rouquerol J., Sing K. S. W. Physisorption of Gases, with Special Reference to the Evaluation of Surface Area and Pore Size Distribution (IUPAC Technical Report). *Pure and Applied Chemistry*, 2015, vol. 87, no. 9–10, pp. 1051–1069. <https://doi.org/10.1515/pac-2014-1117>
11. Fan J., Yu C., Wang L., Tu B., Zhao D., Sakamoto Y., Terasaki O. Mesotunnels on the Silica Wall of Ordered SBA-15 to Generate Three-Dimensional Large-Pore Mesoporous Networks. *Journal of the American Chemical Society*, 2001, vol. 123, no. 48, pp. 12113–12114. <https://doi.org/10.1021/ja011564l>
12. Cai Q., Luo Z.-S., Pang W.-Q., Fan Y.-W., Chen X.-H., Cui F.-Z. Dilute Solution Routes to Various Controllable Morphologies of MCM-41 Silica with a Basic Medium. *Chemistry of Materials*, 2001, vol. 13, no. 2, pp. 258–263. <https://doi.org/10.1021/cm990661z>
13. Widenmeyer M., Anwander R. Pore Size Control of Highly Ordered Mesoporous Silica MCM-48. *Chemistry of Materials*, 2002, vol. 14, no. 4, pp. 1827–1831. <https://doi.org/10.1021/cm011273b>
14. Pantazis C. C., Trikalitis P. N., Pomonis P. J. Highly Loaded and Thermally Stable Cu-Containing Mesoporous Silica – Active Catalyst for the NO + CO Reaction. *Journal of Physical Chemistry B*, 2005, vol. 109, no. 25, pp. 12574–12581. <https://doi.org/10.1021/jp0516689>
15. Kuznetsova T. F., Sauka Ju. D., Ivanets A. I. The Adsorptive Properties of Titanosilicate Xerogels and Membranes of Identical Genesis. Melnyk I., Vaclavikova M., Seisenbaeva G., Kessler V., eds. *Biocompatible Hybrid Oxide Nanoparticles for Human Health*. Netherlands, 2019, pp. 3–14. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-815875-3.00001-1>

Информация об авторах

Кузнецова Татьяна Федоровна – канд. хим. наук, доцент, заведующий лабораторией. Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 9/1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: tatyana.fk@gmail.com.

Агабеков Владимир Енокович – академик, д-р хим. наук, профессор, директор. Институт химии новых материалов НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 36, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: agabekov@ichnm.basnet.by.

Иванец Андрей Иванович – д-р хим. наук, доцент, вед. науч. сотрудник. Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 9/1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: andreiiivanets@ya.ru.

Карпинчик Евгений Васильевич – канд. хим. наук, заведующий лабораторией. Институт химии новых материалов НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 36, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: karpinev@yandex.by.

Саука Юстына Дмитриевна – мл. науч. сотрудник. Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 9/1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: justyna.sauka@gmail.com.

Information about the authors

Kouznetsova Tatyana F. – Ph. D. (Chemistry), Associate professor, Head of the Laboratory. Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: tatyana.fk@gmail.com.

Agabekov Vladimir E. – Academician, D. Sc. (Chemistry), Professor, Director. Institute of Chemistry of New Materials of the National Academy of Sciences of Belarus (36, F. Skorina Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: agabekov@ichnm.basnet.by.

Ivanets Andrei I. – D. Sc. (Chemistry), Associate professor, Leading researcher. Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: andreiiivanets@ya.ru.

Karpinichik Evgeny V. – Ph. D. (Chemistry), Head of the Laboratory. Institute of Chemistry of New Materials of the National Academy of Sciences of Belarus (36, F. Skorina Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: karpinev@yandex.by.

Sauka Justyna D. – Junior researcher. Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: justyna.sauka@gmail.com.