QO‘QON DAVLAT PEDAGOGIKA INSTITUTI ILMIY XABARLARI
(2026-yil 8-son)

TABIIY FANLAR

NATURAL SCIENCES

https://doi.org/10.70728/a.series.tab.v08.i08.035

ВЛИЯНИЕ ДЛИНЫ АЛКИЛЬНОЙ ЦЕПИ КАТИОННОГО ПАВ-ТЕМПЛАТА НА СТРУКТУРНО-ТЕКСТУРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ БИОГЕННОГО МЕЗОПОРИСТОГО КРЕМНЕЗЕМА

Эргашев Сухроб Истам угли
Кокандский государственный университет, соискатель,
e-mail: Ergashev-sukhrob@mail.ru
Муратов Миртохир Мирхалил угли
Институт общей и неорганической химии АН РУз,
докторант (DSc)
Абдикамалова Азиза Бахтияровна
Институт общей и неорганической химии АН РУз,
главный научный сотрудник,
доктор химических наук, профессор
Эшметов Иззат Дусимбатович
Институт общей и неорганической химии АН РУз,
заведующий лабораторией,
доктор технических наук, профессор
Маматалиев Нозим Нимаджонович
Институт общей и неорганической химии АН РУз,
доктор химических наук, e-mail: mamataliyev@gmail.com

Аннотация. В статье рассматривается метод синтеза мезопористых силикатных материалов структуры MCM-41 из возобновляемого агропромышленного сырья - рисовой шелухи. Предлагаемый подход предусматривает использование рисовой шелухи в качестве возобновляемого источника кремнезема вместо традиционных алкоксидных прекурсоров. Для получения биогенного диоксида кремния рисовую шелуху промывали, высушивали и подвергали термической обработке на воздухе при 650 °C. Полученную золу очищали соляной кислотой, после чего кремнезем переводили в растворимую силикатную форму обработкой раствором KOH. Осаждённый биогенный кремнезем использовали для получения раствора силиката натрия и последующего темплатного синтеза MCM-41. Формирование кремнеземного каркаса осуществлялось по механизму жидкокристаллического темплатирования с использованием катионных поверхностно-активных веществ с различной длиной алкильной цепи – C14TAB и C18TAB. Методами малоугловой рентгеновской

дифракции и низкотемпературной адсорбции-десорбции азота подтверждено формирование упорядоченной мезопористой структуры, характерной для материалов типа MCM-41. Установлено, что замена C14TAB на C18TAB приводит к увеличению среднего диаметра мезопор с 3,27 до 4,22 нм и суммарного объёма пор с 0,59 до 0,83 $см^3/г$. При этом оба образца характеризуются высокой удельной площадью поверхности – 918,31 и 936,87 $м^2/г$ для C14-MCM-41 и C18-MCM-41 соответственно.

Ключевые слова: рисовая шелуха, биогенный кремнезем, мезопористые материалы, темплатирование, экономика замкнутого цикла, золь-гель синтез, порометрия.

Abstract. This article describes a method for synthesizing MCM-41-type mesoporous silica materials from a renewable agro-industrial feedstock, namely rice husk. The proposed approach uses rice husk as a renewable silica source in place of conventional alkoxide precursors. To obtain biogenic silica, the rice husk was washed, dried, and thermally treated in air at 650 °C. The resulting ash was purified with hydrochloric acid, after which the silica was converted into a soluble silicate form by treatment with a KOH solution. The precipitated biogenic silica was used to prepare a sodium silicate solution for the subsequent template-directed synthesis of MCM-41. The silica framework was formed via a liquid-crystal templating mechanism using cationic surfactants with different alkyl-chain lengths, namely C14TAB and C18TAB. Low-angle X-ray diffraction and low-temperature nitrogen adsorption–desorption measurements confirmed the formation of an ordered mesoporous structure characteristic of MCM-41-type materials. Replacing C14TAB with C18TAB increased the average mesopore diameter from 3.27 to 4.22 nm and the total pore volume from 0.59 to 0.83 $cm^3\ g^{-1}$. Both samples retained a high specific surface area, reaching 918.31 and 936.87 $m^2\ g^{-1}$ for C14-MCM-41 and C18-MCM-41, respectively.

Keywords: rice husk, biogenic silica, mesoporous materials, templating, circular economy, sol–gel synthesis, porosimetry.

Annotatsiya. Maqolada qayta tiklanuvchi agrosanoat xomashyosi – guruch qobig‘idan MCM-41 turidagi mezog‘ovak silikat materiallarini sintez qilish usuli ko‘rib chiqilgan. Taklif etilayotgan yondashuv an’anaviy alkoksid prekursorlari o‘rniga guruch qobig‘idan qayta tiklanuvchi kremnezem manbai sifatida foydalanishni nazarda tutadi. Biogen kremnezem olish uchun guruch qobig‘i yuvildi, quritildi va 650 °C haroratda havo muhitida termik ishlov berildi. Hosil bo‘lgan kul xlorid kislota bilan tozalandi, shundan so‘ng kremnezem KOH eritmasi bilan ishlov berish orqali eruvchan silikat shakliga o‘tkazildi. Cho‘ktirilgan biogen kremnezem natriy silikat eritmasini tayyorlash va MCM-41 ni keyingi templatli sintez qilish uchun ishlatildi. Kremnezem karkasi alkil zanjiri uzunligi turlicha bo‘lgan kationli sirt-faol moddalar – C14TAB va C18TAB ishtirokida suyuq-kristalli templatlash mexanizmi bo‘yicha shakllantirildi. Kichik burchakli rentgen difraksiyasi hamda past haroratli azot adsorbsiyasi-desorbsiyasi usullari MCM-41 turidagi materiallarga xos bo‘lgan tartiblangan mezog‘ovak tuzilma hosil bo‘lganini tasdiqladi. C14TAB ni C18TAB ga almashtirish o‘rtacha mezog‘ovak diametrining 3,27 dan 4,22 nm gacha va umumiy g‘ovaklar hajmining 0,59 dan 0,83 sm^3/g gacha oshishiga olib kelishi aniqlandi. Bunda har

ikkala namuna ham yuqori solishtirma sirt maydoni bilan tavsiflandi: C14-MCM-41 uchun 918,31 m^2/g va C18-MCM-41 uchun 936,87 m^2/g.

Kalit so‘zlar: guruch qobig‘i, biogen kremnezem, mezog‘ovak materiallar, templatlash, aylanma iqtisodiyot, zol-gel sintezi, porometriya.

Введение. Глобальный переход химической инженерии и материаловедения к парадигме экономики замкнутого цикла (циркулярной экономики) диктует настоятельную необходимость пересмотра традиционных подходов к производству функциональных наноматериалов [1-4]. Основная цель данной парадигмы заключается в максимальном повышении эффективности использования возобновляемых ресурсов и минимизации промышленных отходов, что способствует не только экономическому, но и социальному росту за счет решения проблем управления отходами. В контексте создания современных адсорбционных и каталитических систем поиск экологически чистых, легкодоступных и экономически рентабельных прекурсоров приобретает критическое значение. Мезопористые кремнеземы семейства M41S, синтезированные впервые в начале 1990-х годов, и в частности их наиболее известный представитель – структура MCM-41, характеризуются упорядоченным гексагональным расположением мезопор, узким распределением пор по размерам, высокой удельной площадью поверхности, достигающей 1500 $м^2$/г, и исключительной термической стабильностью [5-7]. Эти физико-химические свойства обусловливают перспективность их применения в качестве матриц для селективной сорбции и гетерогенного катализа.

Тем не менее, широкое промышленное масштабирование процессов синтеза классического MCM-41 исторически сдерживается высокой стоимостью, летучестью и токсичностью традиционных алкоксидных источников кремния, таких как тетраэтоксисилан (TEOS) и тетраметоксисилан (TMOS) [8]. Альтернативным, крупнотоннажным и экологически безопасным источником биогенного диоксида кремния выступает агропромышленная биомасса, среди которой одним из наиболее перспективных источников является рисовая шелуха. Рисовая шелуха представляет собой кремнийсодержащий отход сельскохозяйственного производства. Содержание золы в исходной шелухе обычно составляет около 15–25 мас.%, при этом основной минеральной составляющей зольного остатка является диоксид кремния. При соответствующей химической и термической обработке из золы может быть получен преимущественно аморфный кремнезем высокой степени чистоты [9-11].

Фундаментальная проблематика синтеза заключается в том, что прямое термическое прокаливание (сжигание) рисовой шелухи без предварительной подготовки часто приводит к образованию низкопористого кремнезема с удельной поверхностью порядка 10 $м^2$/г, который практически невозможно трансформировать в высокоупорядоченную структуру MCM-41 из-за спекания частиц и фазовых переходов аморфного остова в кристаллические модификации (кварц или кристобалит). Следовательно, необходима тонкая оптимизация стадий термохимической экстракции, включающая кислотное или щелочное выщелачивание, и последующего золь-гель

синтеза. Использование катионных поверхностно-активных веществ с различной длиной алкильной цепи в качестве супрамолекулярных темплатов позволяет направленно управлять мицеллообразованием, диаметром пор и общей архитектурой мезофазы. Целью работы являлось сравнительное исследование влияния длины алкильной цепи катионных ПАВ C14TAB и C18TAB на структурные и текстурные характеристики MCM-41, синтезированного из биогенного кремнезема рисовой шелухи при сопоставимых условиях.

Материалы и методы

В качестве исходного сырья использовали рисовую шелуху, собранную на предприятиях агропромышленного комплекса Хорезмской области. Влажность воздушно-сухого сырья составляла 9,8–10,0%, зольность 17–18%.

Получение биогенного кремнезема

Методику получения биогенного кремнезема рассчитывали на 100 г воздушно-сухой рисовой шелухи. Сырьё несколько раз промывали водопроводной водой для удаления пыли и растворимых примесей, затем дважды промывали деионизированной водой и высушивали при 105 °C до постоянной массы. Высушенную рисовую шелуху нагревали в муфельной печи до 650 °C со скоростью 5 °C/мин и выдерживали при этой температуре в течение 3 ч. Полученную золу измельчали до однородного порошка.

Золу рисовой шелухи обрабатывали раствором HCl концентрацией 1,0 моль/л при отношении твёрдой и жидкой фаз 1:10, температуре 90 °C и продолжительности 2 ч. После кислотной обработки твёрдую фазу отделяли фильтрованием, промывали деионизированной водой до нейтрального значения pH и высушивали при 105 °C.

Очищенную золу обрабатывали раствором KOH концентрацией 3,0 моль/л при 70 °C до достижения pH около 12. Полученную суспензию фильтровали для удаления нерастворимого остатка. Раствор силиката калия обрабатывали раствором HCl концентрацией 1,0 моль/л при 60 °C до образования силикагеля. Осаждённый кремнезем отделяли фильтрованием, промывали деионизированной водой и высушивали при 105 °C.

Получение раствора силиката натрия

Для получения раствора силиката натрия 20,0 г очищенного биогенного кремнезема смешивали с 26,7 г NaOH. Общую массу смеси доводили деионизированной водой до 100,0 г. Предварительно NaOH полностью растворяли в 55,0 г деионизированной воды при интенсивном перемешивании, после чего раствор охлаждали до температуры ниже 40 °C. Биогенный кремнезем добавляли постепенно при постоянном перемешивании. Суспензию нагревали при 90–100 °C в течение 3–4 ч до образования прозрачного однородного раствора. После охлаждения массу раствора доводили до 100,0 г и фильтровали. Полученный раствор содержал приблизительно 20 мас.% SiO_2 и имел pH 12–13.

Темплатный синтез MCM-41

Для каждого синтеза готовили 1,0 л водного раствора ПАВ. При получении C14-MCM-41 использовали 8,40 г тетрадецилтриметиламмония бромида, а при получении

C18-MCM-41 – 9,80 г октадецилтриметиламмония бромида. Указанные количества соответствовали молярному отношению ПАВ:SiO_2 = 0,15:1.

ПАВ растворяли в деионизированной воде при 40 °C и скорости перемешивания 600 об/мин до получения прозрачного раствора. Значение pH доводили до 10,5–11,0 по каплям раствором NaOH концентрацией 1,0 моль/л. Затем к раствору ПАВ по каплям добавляли 50,0 г 20%-ного раствора силиката натрия, содержащего 10,0 г SiO_2. После введения силикатного прекурсора реакционную смесь перемешивали при 40 °C в течение 3 ч.

Полученный гель переносили в стальные автоклавы с тефлоновой футеровкой и подвергали гидротермальной обработке при 100 °C в течение 24 ч. После охлаждения твёрдый продукт отделяли фильтрованием и промывали деионизированной водой до установления постоянной электропроводности промывной жидкости. Образцы высушивали при 120 °C в течение 12 ч.

Темплат удаляли прокаливанием на воздухе. Высушенные образцы нагревали до 540 °C со скоростью 1,0 °C/мин, выдерживали при этой температуре в течение 5 ч и охлаждали до комнатной температуры.

При расчёте на 100 г воздушно-сухой рисовой шелухи выход прокалённого мезопористого кремнезема составлял 16,2 ± 0,5 г. Указанное значение характеризует лабораторный выход продукта при использованных условиях; технико-экономическая оценка и исследование масштабирования процесса не проводились.

Термическое поведение исходной рисовой шелухи исследовали методом синхронного термического анализа (ТГ/ДТА, LABSYS EVO) в окислительной и инертной атмосферах [12]. Характеризация фазового состава и параметров гексагональной мезофазы осуществлялась методом малоугловой рентгеновской дифракции на дифрактометре Rigaku Miniflex 600 [13]. Текстурные параметры (удельная площадь поверхности, объем и распределение пор по размерам) вычислялись на основе изотерм низкотемпературной (77 K) физической сорбции азота с применением математических моделей Брунауэра-Эммета-Теллера (БЭТ) и Барретта-Джойнера-Халенды (БДХ) [14-15]

Результаты и их обсуждение

Термический анализ исходной рисовой шелухи

Исследование термического поведения исходной биомассы необходимо для выбора условий получения кремнеземсодержащего минерального остатка.

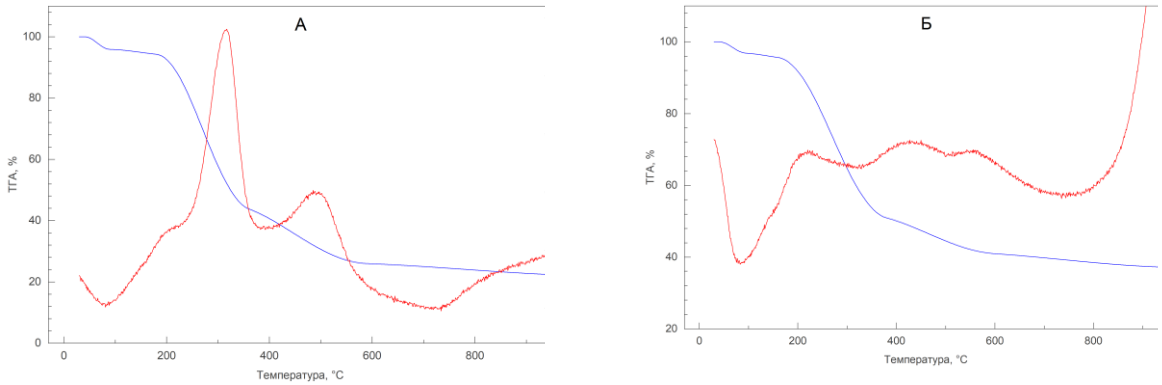


Рис. 1. Кривые ТГА и ДТА исходной рисовой шелухи, зарегистрированные в атмосфере воздуха (А) и аргона (Б).

Термическое разложение лигноцеллюлозного комплекса условно можно разделить на три основные стадии: эндотермическое испарение физически связанной влаги и летучих фракций (25–150 °C), экзотермическая деструкция гемицеллюлозы и целлюлозы (150–450 °C) и высокотемпературное разложение полимерной ароматической структуры лигнина (450–700 °C). Анализ потери массы в зависимости от температуры и среды представлен в Таблице 1.

Таблица 1.

Потеря массы при термической обработке рисовой шелухи (%)

Атмосфера	**100 °C**	**200 °C**	**300 °C**	**400 °C**	**500 °C**	**600 °C**	**700 °C**	**800 °C**	**900 °C**
Воздух	2,3	6,1	30,5	54,2	72,0	73,6	76,8	77,5	78,2
Аргон	2,0	4,5	18,7	47,8	56,3	57,9	59,6	60,8	61,9

Из представленных данных очевидно, что в диапазоне 110–120 °C происходит десорбция влаги с потерей массы 2,0–2,6 %. Интенсивное термическое разложение органической составляющей начинается при температурах свыше 227 °C. Вблизи отметки 300 °C наблюдается резкое снижение массы на кривой TG: потеря массы достигает 30,5 % на воздухе и 18,7 % в аргоне. Это свидетельствует об активном разрушении гликозидных связей в полисахаридах. При дальнейшем нагреве до 500 °C в воздушной среде происходит интенсивное окисление углеродсодержащего остатка с образованием CO и CO_2, что сопровождается интенсивными экзотермическими эффектами на кривой ДТА (в частности, пик деградации лигнина при 496 °C).

При нагревании в атмосфере воздуха суммарная потеря массы к 900 °C составила 78,2%, тогда как в атмосфере аргона она достигла 61,9%. Более высокая остаточная масса в инертной атмосфере связана с сохранением углеродсодержащего остатка. Для препаративного получения золы рисовой шелухи была выбрана термическая обработка на воздухе, поскольку она обеспечивает более полное удаление органической составляющей. В дальнейшем золу подвергали кислотной очистке и щелочной экстракции кремнезема.

Параметры гексагональной мезофазы (рентгенофазовый анализ)

Формирование упорядоченной мезопористой структуры оценивали методом малоугловой рентгеновской дифракции. Для мезопористых силикатов типа MCM-41 характерно наличие интенсивного дифракционного максимума в диапазоне малых углов (2θ = 1,5–6,0°), отражающего дальний структурный порядок одномерных цилиндрических каналов, упакованных в гексагональную двумерную решетку (отражение от плоскости (100)).

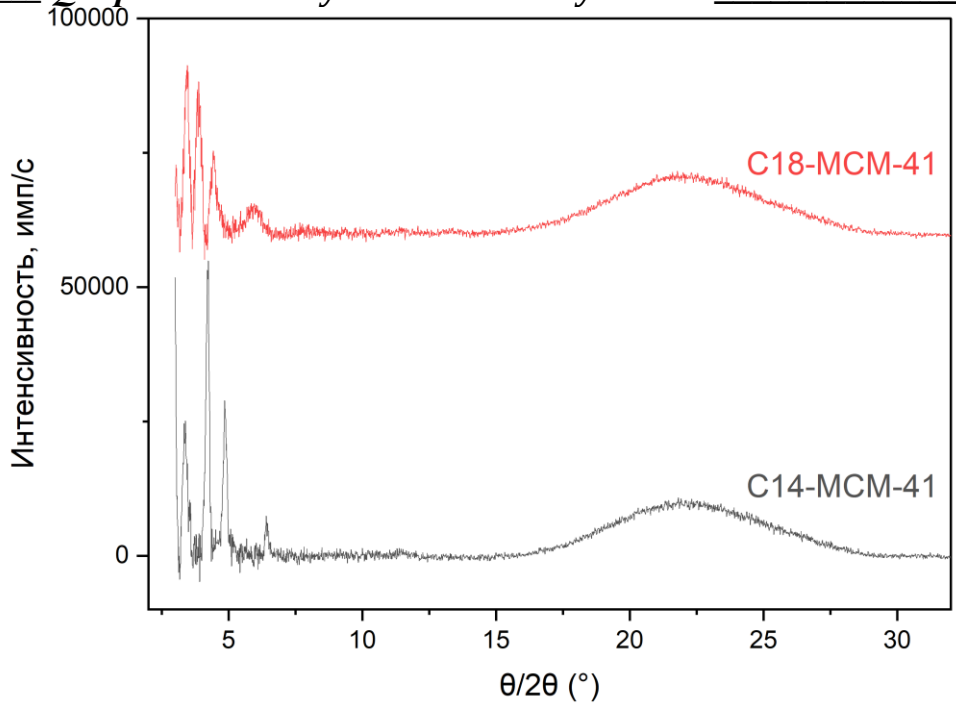


Рис. 2. Малоугловые и широкоугловые рентгеновские дифрактограммы образцов C14-MCM-41 и C18-MCM-41.

Для образца C14-MCM-41, синтезированного с использованием темплата тетрадецилтриметиламмония бромида, главный рефлекс (100) четко локализуется при 2θ = 2,33°. Применяя закон Вульфа-Брэгга ($\lambda = 2d\sin\theta$), было рассчитано межплоскостное расстояние d_{100}, составившее 37,89 Å. Геометрический параметр элементарной ячейки (a_0), вычисляемый по формуле $a_0 = 2d_{100}/\sqrt{3}$ для гексагональной симметрии, достиг 43,75 Å.

Закономерные структурные трансформации наблюдаются при замене темплата на гомолог с более длинной алифатической цепью – октадецилтриметиламмоний бромид (C18-MCM-41). Рефлекс (100) ожидаемо смещается в сторону меньших углов до 2θ = 1,91°, что свидетельствует о физическом расширении межплоскостного расстояния до d_{100} = 46,20 Å и увеличении константы ячейки a_0 до 53,35 Å.

Важнейшим критерием механической стабильности сорбента является толщина стенок аморфного кремнезема (Wt). На основе комбинации данных XRD и газовой порометрии ($Wt = a_0 - D_p$), было установлено, что толщина стенок для C14-MCM-41 и C18-MCM-41 составляет 11,03 Å (1,10 нм) и 11,12 Å (1,11 нм) соответственно. Полученные значения показывают, что рассчитанная толщина стенок для двух образцов остаётся близкой и составляет около 1,1 нм. Поскольку диаметр пор определяли методом BJH, значения диаметра пор и толщины стенок следует рассматривать как сравнительные оценки.

Текстурные свойства и порометрия (модели БЭТ и БДХ)

Исследование развития пористого пространства является ключевым этапом, так как именно текстурные характеристики предопределяют кинетику массопереноса и общую емкость адсорбентов. Изотермы низкотемпературной физической сорбции азота для синтезированных силикатов классифицируются как изотермы типа IV(a)

согласно актуальной номенклатуре IUPAC. В области относительных давлений (P/P_0) 0,3–0,4 наблюдается резкая ступень капиллярной конденсации газа, сопровождающаяся формированием петли гистерезиса. Наличие капиллярно-конденсационной ступени и петли гистерезиса согласуется с мезопористой природой образцов. Относительно узкие петли гистерезиса указывают на сравнительно однородную мезопористую структуру, однако геометрия пор не может быть однозначно установлена только по форме изотерм.

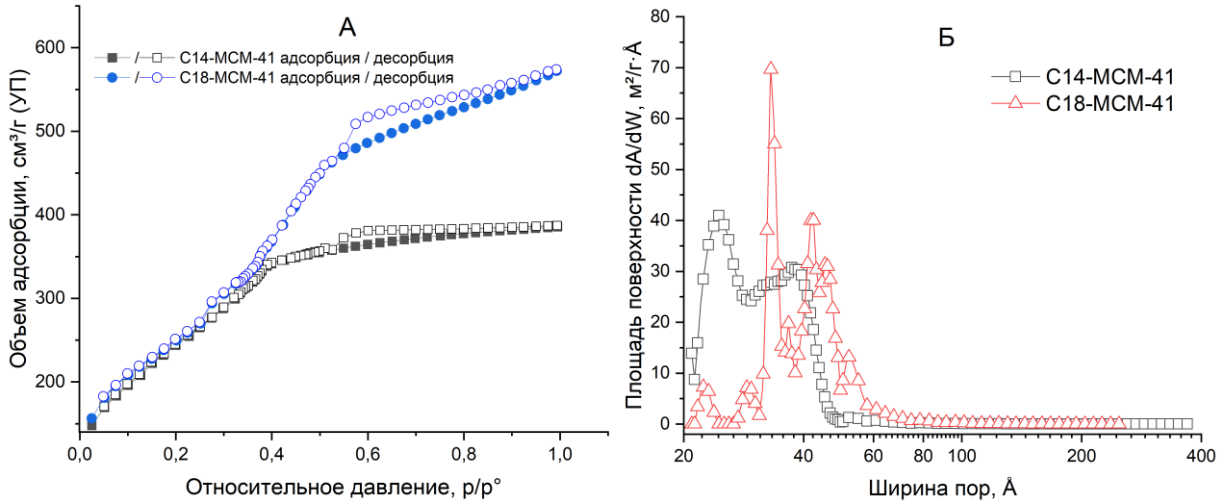


Рис. 3. Изотермы адсорбции-десорбции азота при 77 K (А) и кривые распределения пор по размерам по методу Барретта-Джойнера-Халенды (BJH) (Б) для образцов C14-MCM-41 и C18-MCM-41ю

Таблица 2.

Текстурные характеристики биогенных матриц MCM-41.

Параметр порометрии	C14-MCM-41	C18-MCM-41
Удельная площадь поверхности (SБЭТ), м2/г	918,31	936,87
Суммарный объем пор (Vпор), см3/г	0,59	0,83
Средний диаметр мезопор (Dp по BJH), Å	32,72	42,23

Результаты анализа по методам БЭТ и BJH показывают закономерное изменение текстурных характеристик при увеличении длины алкильной цепи ПАВ-темплата. Образец C14-MCM-41 характеризуется удельной площадью поверхности 918,31 $м^2/г$ при среднем диаметре пор 32,72 Å. Интеграция в систему темплата C18TAB, обладающего удлиненным гидрофобным «хвостом», способствует формированию мицеллярных агрегатов большего размера. Как следствие, диаметр пор расширяется на 29% (до 42,23 Å), что сопровождается увеличением суммарного объёма пор с 0,59 до 0,83 $см^3/г$.

Метод BJH в настоящей работе применяли главным образом для сравнительной оценки образцов. Для мезопор размером около 3–4 нм полученные значения могут зависеть от допущений уравнения Кельвина. Поэтому диаметры пор 3,27 и 4,22 нм следует рассматривать как модельно-зависимые оценки. Для более точного определения абсолютных размеров мезопор целесообразно применение методов NLDFT.

При переходе от C14TAB к C18TAB удельная площадь поверхности изменялась незначительно – от 918,31 до 936,87 $м^2$/г. Таким образом, увеличение среднего диаметра и суммарного объёма пор не сопровождалось заметным снижением удельной площади поверхности. Полученные данные показывают возможность изменения текстурных характеристик MCM-41 путём варьирования длины алкильной цепи ПАВ-темплата.

Заключение

Из биогенного кремнезема рисовой шелухи синтезированы мезопористые материалы C14-MCM-41 и C18-MCM-41 с использованием тетрадецилтриметиламмония бромида и октадецилтриметиламмония бромида в качестве структурообразующих агентов. Полученные материалы характеризуются мезопористой структурой, соответствующей типу MCM-41, и высокой удельной площадью поверхности.

Увеличение длины алкильной цепи ПАВ с C14 до C18 сопровождалось смещением рефлекса (100) от 2θ=2,33° до 1,91°, увеличением параметра гексагональной ячейки от 4,38 до 5,34 нм и увеличением среднего диаметра мезопор от 3,27 до 4,22 нм. Суммарный объём пор возрастал от 0,59 до 0,83 $см^3$/г, тогда как удельная площадь поверхности сохранялась на уровне выше 918 $м^2$/г.

Изменение длины алкильной цепи катионного ПАВ-темплата позволяет направленно изменять текстурные характеристики биогенного MCM-41. Полученные результаты подтверждают возможность использования рисовой шелухи в качестве возобновляемого источника кремнезема для синтеза мезопористых силикатных материалов.

Список литературы

1. M. Behún, A. Behúnová, Advanced Innovation Technology of BIM in a Circular Economy. Applied Sciences (Switzerland). 13 (2023), doi:10.3390/app13137989.

2. M. M. Abady, D. M. Mohammed, T. N. Soliman, R. A. Shalaby, F. A. Sakr, Sustainable synthesis of nanomaterials using different renewable sources. Bulletin of the National Research Centre. 49 (2025), doi:10.1186/s42269-025-01316-4.

3. A. Ncube, S. Mtetwa, M. Bukhari, G. Fiorentino, R. Passaro, Circular Economy and Green Chemistry: The Need for Radical Innovative Approaches in the Design for New Products. Energies. 16 (2023), doi:10.3390/en16041752.

4. L. M. Gilbertson, J. B. Zimmerman, D. L. Plata, J. E. Hutchison, P. T. Anastas, Designing nanomaterials to maximize performance and minimize undesirable implications

guided by the Principles of Green Chemistry. Chemical Society Reviews. 44, 5758–5777 (2015).

5. D. Zhao, J. Feng, Q. Huo, N. Melosh, G.H. Fredrickson, et al., Triblock copolymer syntheses of mesoporous silica with periodic 50 to 300 angstrom pores. Science, 279 (1998) 548-552.

6. F. Hoffmann, M. Cornelius, J. Morell, M. Fröba, Silica-based mesoporous organic–inorganic hybrid materials. Angew. Chem. Int. Ed., 45 (2006) 3216-3251.

7. G. Celoria, F. Begni, G. Paul, S. Marchesi, E. Boccaleri, C. Bisio, L. Marchese, Nanosized MCM-41 silica from rice husk and its application for the removal of organic dyes from water. RSC Adv., 15 (2025) 2545-2553.

8. H. Nakashima, K. Omae, T. Takebayashi, Ch. Ishizuka, T. Uemura, Toxicity of Silicon Compounds in Semiconductor Industries, Journal of Occupational Health, Volume 40, Issue 4, October 1998, Pages 270–275.

9. C. Real, M.D. Alcala, J.M. Criado, Preparation of silica from rice husks. Journal of the American Ceramic Society, 79 (1996) 2012-2016.

10. J.M. Juárez, J.F. Téllez, M.Á.L. Bercero, E.L. Moyano, M.B. Gómez Costa, Synthesis of MCM-41 and SBA-15 from rice husk silica and their carbon replicas for hydrogen adsorption. J. Chem. Technol. Biotechnol., 100 (2025) 1609-1617.

11. S. Suyanta, A. Kuncaka, Utilization of rice husk as raw material in synthesis of mesoporous silicates MCM-41. Indonesian Journal of Chemistry, 11 (2011) 50-54.

12. Khoshimov S. et al. Changes in the porous structure of carbonizate of carbon containing raw under alkaline activation //AIP Conference Proceedings. – AIP Publishing LLC, 2024. – T. 3045. – №. 1. – C. 030059.

13. Askarova D. et al. Advancing carbon adsorbents from biomass: Physicochemical analysis of Licorice root waste //AIP Conference Proceedings. – AIP Publishing LLC, 2025. – T. 3304. – №. 1. – C. 040011.

14. Salikhanova D, Muratov M, Usmonova Z, Abdikamalova, A., Eshmetov, I., Jumayeva, D., Sagdullayeva, D., Ismoilova, M., Kadirova, N., Eshmetov, R. Engineering high-performance activated carbons from plum pit shells for efficient copper(II) removal: Synthesis, structural characterization, and adsorption mechanisms.Ecological Engineering & Environmental Technology. 2026;27(6):135–152. doi. 10.12912/27197050/221291

15. Jumanazarova, Z. K., Kadirova, Sh. A., Kattaev, N. T., & Zakirova, R. P. (2025). New magnesium coordination compound as a "green" plant growth stimulator. Processes of Petrochemistry and Oil Refining, 26(2), 574–579.