

## **ПОЛУЧЕНИЕ АЭРОГЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ДИОКСИДА КРЕМНИЯ И ЛИГНИНА**

Аэрогели относятся к пористым материалам, характеризующимся малой плотностью и большой удельной поверхностью. Они широко используются в качестве теплоизоляционных звукоизоляционных материалов, подложек для фильтрационных материалов и сорбентов, носителей катализаторов активных веществ для фармацевтической промышленности. В структуре аэрогелей обычно присутствуют микро- и мезопоры (где размер пор не превышает 50 нм). Аэрогели могут быть получены из различных прекурсоров, образующих алко- и гидрогели. Проведение сверхкритической (СК) сушки позволяет сохранить высокопористую структуру и получить аэрогель.

В настоящей работе представлены результаты работ по получению аэрогелей на основе диоксида кремния и лигнина [1]. Аэрогель на основе диоксида кремния (материал, полученный сушкой в сверхкритических условиях) - особый материал, обладающий уникальными свойствами, такими как малая плотность, большая удельная поверхность, большой объем пор, низкая теплопроводность. Эти свойства обуславливают их применение в качестве изоляционного материала, энтеросорбента и носителя для катализаторов и лекарственных препаратов [2].

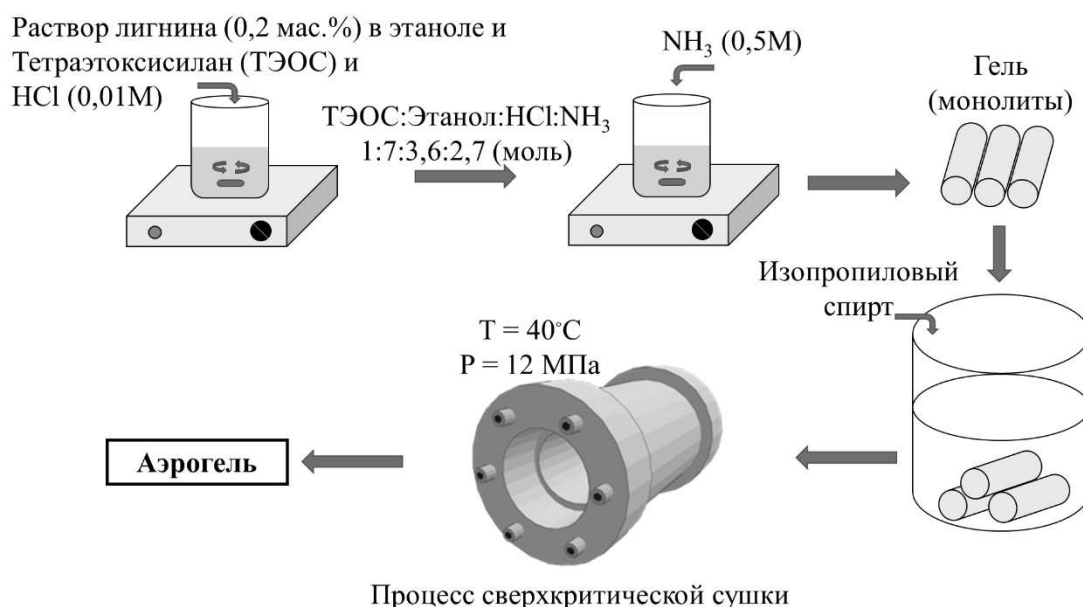
Сушка в сверхкритических условиях предотвращает сжатие трехмерной сетки гидрогеля за счет действия капиллярных сил, характерных для традиционной термической сушки. Таким образом, в атмосфере СК-СО<sub>2</sub> синтезирован мезопористый материал с широким распределением пор по размерам и их преобладающим диаметром в диапазоне 20-50 нм.

Для сравнения, сушка того же геля при 100°C приводит к образованию структуры с тонкими порами менее 5 нм и очень узким распределением их диаметров. Объем пор уменьшается на порядок с 5,3 до 0,5 см<sup>3</sup>/г. Выше описанные структурные характеристики аэрогелей на основе диоксида кремния делают их перспективными адсорбентами [3,4].

Особое практическое значение имеют микро- и мезопористые органо-неорганические аэрогели на основе диоксида кремния и стеклоуглеродных материалов. Лигнин – природный ароматический по-

лимер растительного происхождения. Считается, что фенольные соединения в молекуле лигнина обладают антиоксидантной способностью, в основном благодаря наличию функциональных групп -ОН в фенольном кольце, которые могут нейтрализовать реактивные свободные радикалы и защищать биомолекулы от окисления [5]. Таким образом, лигнин является привлекательным предшественником для производства высокопористых органических минеральных аэрогелей, которые могут применяться в пищевой и фармацевтической промышленности.

Данная работа направлена на синтез аэрогелей на основе диоксида кремния и лигнина методом сверхкритической сушки и изучение их характерных текстурных свойств. Аэрогели на основе диоксида кремния и лигнина синтезировали золь-гель методом показан на рисунке 1.



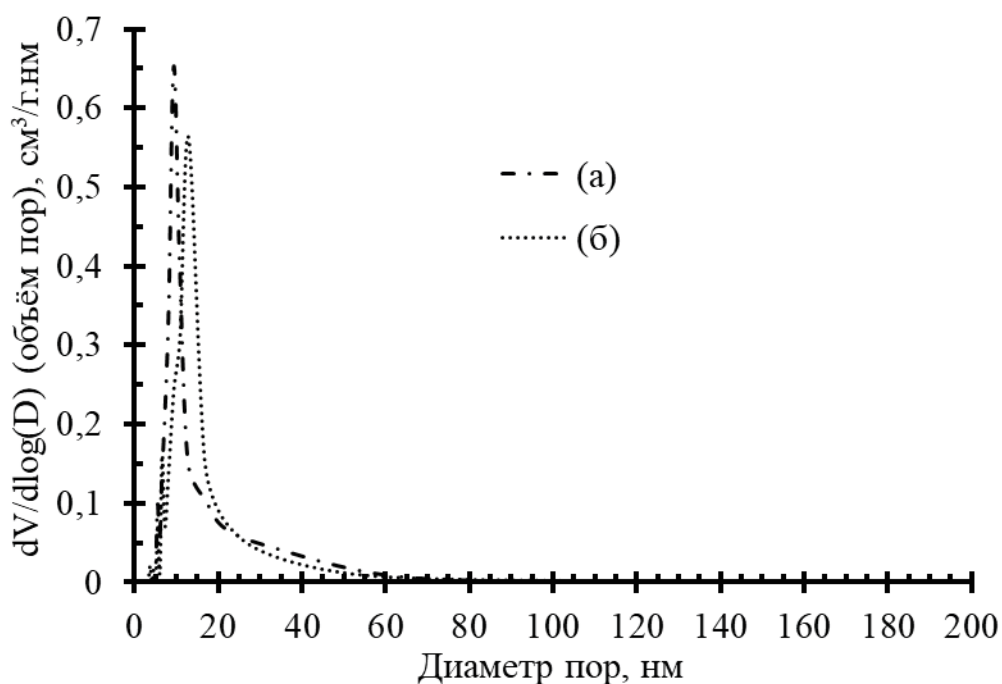
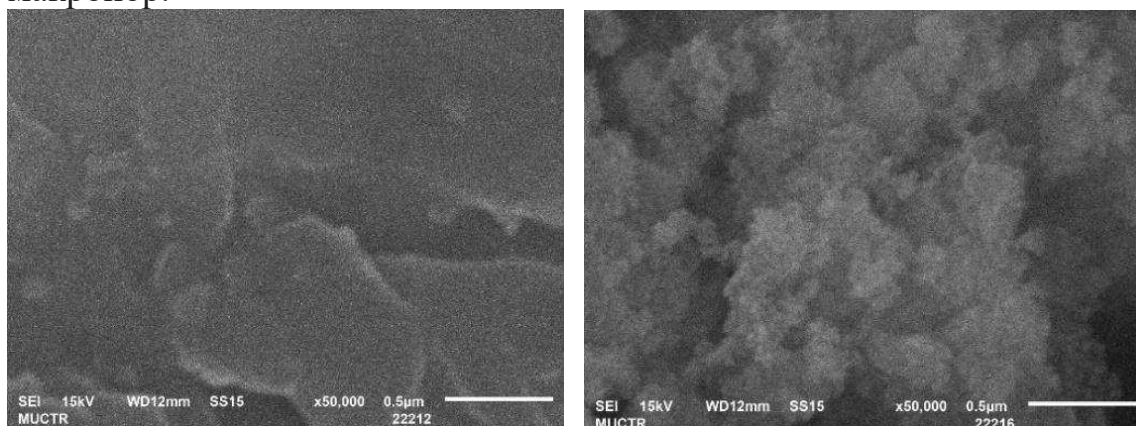
**Рисунок 1 – Схема получения монолитов аэрогеля на основе диоксида кремния и лигнина**

Формирование геля происходило через 24 ч при комнатной температуре. Растворитель в порах геля заменяли на изопропиловый спирт. После этого проводили процесс сверхкритической сушки гелей. На рисунке 2 представлено распределение пор по размерам, полученное с помощью обработки результатов азотной порометрии методом Баррета-Джойнера-Халенды (БДХ).

Форма кривых свидетельствует о наличии преимущественно мезопор в диапазоне от 5 до 20 нм. Кроме того, на рисунке 2 представлены изображения гибридных аэрогелей на основе диоксида кремния

и лигнина, полученные методом сканирующей электронной микроскопии.

По мере лигнин присутствует в структуре аэрогелевых материалов, структура матрицы в аэрогелях на основе диоксида кремния и лигнина улучшается с образованием большего количества мезопор и макропор.



**Рисунок 2 – Морфология и распределение пор по размерам аэрогелей: (а) диоксид кремния аэрогель, (б) диоксид кремния с лигнином**

В таблице 1 представлены следующие характеристики аэрогелей на основе диоксида кремния и лигнина: удельная площадь поверхность  $S_{БЭТ}$ ,  $m^2/g$ ; объем мезопор  $V_m$ ,  $cm^3/g$ ; объем всех пор  $V_p$ ,  $cm^3/g$ ; пористость  $\phi$ , %; кажущаяся плотность  $\rho$ ,  $g/cm^3$ ; истинная плотность образцов  $\rho_{ист}$ ,  $g/cm^3$ ; линейная усадка  $L$ , %.

Экспериментальные данные приведены в размерностях, которые обычно используются для характеристики аэрогелей.

Линейная усадка рассчитывалась от стадии гелеобразования до получения материала после сверхкритической сушки.

**Таблица 1 – Характеристики композиционных аэрогелей на основе диоксида кремния и лигнина**

Образец	$S_{БЭТ}$ , м <sup>2</sup> /г	$V_M$ , см <sup>3</sup> /г	$V_P$ , см <sup>3</sup> /г	$\phi$ , %	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	L, %	$\rho_{ист}$ , г/см <sup>3</sup>
(а)	941	4,7	12,2	96	0,079	4,0	2,118
(б)	1214	4,8	5,2	93	0,176	20,9	1,934

Полученные аэрогели на основе диоксида кремния и лигнина обладают следующими характеристиками: удельная поверхность в диапазоне от 941 до 1214 м<sup>2</sup>/г; средний размер пор от 5 до 20 нм, общий объем пор от 5,2 до 12,2 см<sup>3</sup>/г. Полученные аэрогели на основе диоксида кремния и лигнина соответственно, с развитой структурой, перспективны для разработки новых систем доставки лекарственных средств, катализаторов, сорбентов и сенсоров.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. I. S. Brilliantova, I. V. Lebedev, M. G. Gordienko, N. V. Menshutina. Synthesis and Analysis of Silica-Resorcinol-Formaldehyde Aerogels // Russian Journal of Physical Chemistry B, 2019, Vol. 13, No. 7, pp. 1174-1181.
2. T. V. Konkova, M. G. Gordienko, M. B. Alekhina, N. V. Menshutina. Synthesis of Silica Gels with a Controlled Porous Structure // Russian Journal of Inorganic Chemistry, 2014, Vol. 59, No. 11, pp. 1214-1218.
3. T. V. Konkova, M. G. Gordienko, N. V. Menshutina, V. A. Kolenikov. Adsorption Properties of Aerosilicagels Prepared by Drying in a Supercritical Carbon Dioxide Medium // Russian Journal of Physical Chemistry B, 2018, Vol. 12, No. 7, pp. 1120-1124.
4. Natalia Menshutina, Pavel Tsygankov, Illarion Khudeev, Artem Lebedev. Intensification methods of supercritical drying for aerogels production // Drying Technology, 2021. Vol. 40, No 7, pp 1278-1291.
5. Adam Ekielski, Pawan Kumar Mishra. Lignin for Bioeconomy: The Present and Future Role of Technical Lignin// Int. J. Mol. Sci. 2021, 22(1), 63; <https://doi.org/10.3390/ijms22010063>.