

## ПОЛУЧЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ СВЕТОПРОНИЦАЕМЫХ НЕОРГАНИЧЕСКИХ АЭРОГЕЛЕЙ

Аэрогели – это твердотельные материалы, которые обладают выдающимися физическими свойствами. Благодаря высокопористой структуре и развитой внутренней поверхности аэрогели обладают уникальными свойствами, среди которых высокая площадь удельной поверхности ( $>1000 \text{ м}^2/\text{г}$ ), низкая плотность ( $3\text{-}100 \text{ кг}/\text{м}^3$ ), низкие коэффициент теплопроводности ( $<20 \text{ мВт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ ) и индекс звукоизоляции ( $28\text{-}37 \text{ дБ}$ ) [1].

Представленные свойства делают аэрогели перспективными для использования во многих сферах жизни, в частности, они могут быть использованы в качестве сорбентов, химических и биологических датчиков [2], носителей активных веществ [3], а также фотоактивных и люминесцентных соединений. Особенно широкое применение аэрогели нашли в области тепло- и звукоизоляции [4].

В данном контексте, под теплоизоляционными материалами могут подразумеваться не только аэрогели, армированные волокном (например, стекловолокном), но и светопроницаемые аэрогели, которые могут использоваться для остекления зданий.

Процессы получения светопроницаемых аэрогелей включают в себя 4 основных этапа: получение алкогеля на основе диоксида кремния, старение гелей, замены растворителя и процесс сверхкритической сушки. При получении гидрофобных аэрогелей перед сверхкритической сушкой дополнительно проводится этап модификации поверхности.

На первом этапе получения готовится золь с мольными соотношениями прекурсора: растворитель: кислотный катализатор: гелирующий агент =  $1:7:3.5:2.5$ ,  $1:10:3.5:2.5$  и  $1:14:3.5:2.5$  соответственно. В качестве прекурсора используется тетраэтоксисилан (ТЭОС), в качестве органического растворителя – метиловый спирт. Кислотным катализатором является  $0.01\text{М}$  водный раствора соляной кислоты  $\text{HCl}$ . Золь перемешивается в течение 24 часов. На этапе получения геля к золю добавляется гелирующий агент – водный раствор аммиака с концентрацией  $0.05\text{М}$ . Затем смесь перемешивается в течение 5 минут и помещается в заранее подготовленные фторопластовые формы размером  $10\times 10\times 1 \text{ см}$ . В них образцы находятся в течение 24 часов для завершения процесса гелеобразования.

На втором этапе проводится старение гелей для упрочнения структуры материала. Для этого образцы помещаются в 0.5М раствор аммиака в этиловом спирте. Старение гелей длится не менее 72 часов при температуре 60°C в муфельной печи.

На стадии замены растворителя образцы помещаются в 100% изопропиловый спирт (ИПС). Замена проводится трижды для удаления из материала остаточной воды и непрореагировавших соединений. В каждом растворе гели находятся не менее 6 часов при перемешивании.

Для проведения дополнительной модификации поверхности гели помещаются в 10 масс% раствор гидрофобизирующего агента – гидрофобизирующей кремнийорганической жидкости (ГКЖ) в ИПС. Процесс гидрофобизации проходит в муфельной печи при температуре 60°C в течение 16 часов.

Завершающим этапом является процесс сверхкритической сушки. Процесс проводится на установке для сверхкритических процессов кафедры химического и фармацевтического инжиниринга РХТУ им. Д.И. Менделеева. В качестве сверхкритического флюида выступает диоксид углерода CO<sub>2</sub>. Процесс ведется при температуре 40°C и давлении 120 бар.

Для всех полученных образцов были определены значения усадки L и кажущихся плотностей ρ. Методом азотной порометрии были получены изотермы адсорбции, дифференциальные кривые распределения пор по размерам, определены значения удельных поверхностей S<sub>уд</sub> и пористости ε двух образцов с разбавлениями 1:7 и 1:10. В таблице 1 приведены результаты аналитических исследований полученных образцов.

**Таблица 1 – Характеристики аэрогелей**

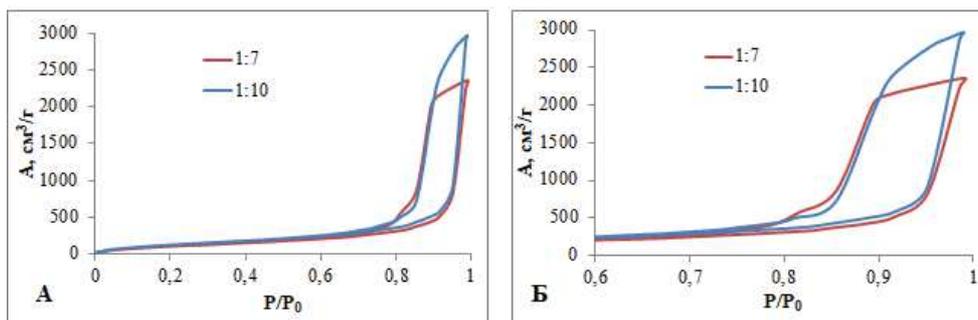
Мольное соотношение ТЭОС:СН <sub>3</sub> ОН	Гидрофобность	L, %	ρ, г/см <sup>3</sup>	S <sub>уд</sub> , м <sup>2</sup> /г	ε, %
1:7	Гидрофобный	16	0.199	452.7	95
1:10	Гидрофильный	20	0.179	343.2	90
1:10	Гидрофобный	15	0.195	528.2	96
1:14	Гидрофобный	16	0.178	425.4	97

Показано, что образцы обладают высокой удельной площадью поверхности и высокой пористостью. Важно отметить, что гидрофильный образец обладает меньшим значением удельной площади поверхности и пористости, в сравнении с гидрофобными образцами. Возможно, это связано с тем, что гидрофобные материалы обладают бо-

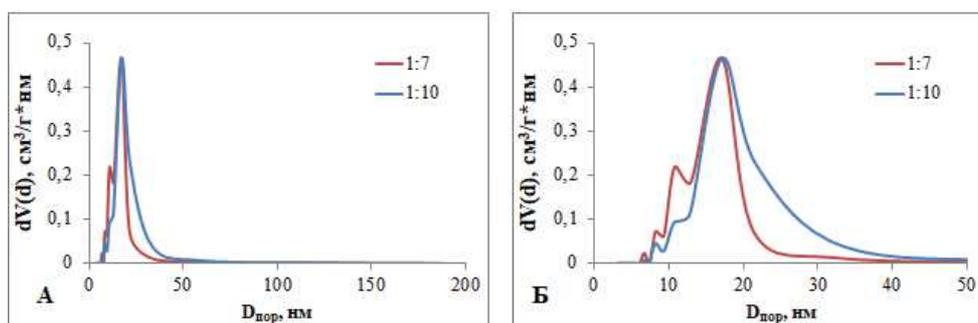
лее прочной структурой вследствие модификации их внутренней поверхности.

Кроме того, было определено значение коэффициента теплопроводности для образца 1:10, которое составило 14 мВт/(м<sup>2</sup>·К), что указывает на высокие теплоизоляционные характеристики.

Далее были исследованы изотермы адсорбции/десорбции (рисунок 1) и дифференциальные кривые распределения пор по размерам (рисунок 2) образцов.



**Рисунок 1 – Кривые адсорбции/десорбции полученных образцов: А – в диапазоне P/P<sub>0</sub> 0-1.0, Б – в диапазоне 0.6-1.0**



**Рисунок 2 – Распределение пор по размерам: А – в диапазоне диаметра пор 0-200 нм, Б – 0-50 нм**

Изотермы адсорбции/десорбции относятся к IV типу согласно классификации IUPAC. Наличие петли гистерезиса указывает на протекание капиллярной конденсации в мезопорах (2-50 нм). Данная петля гистерезиса относится к типу H1, что характерно для пористой структуры, частицы которой имеют сферическую форму близкого размера. По дифференциальным кривым распределения пор по размерам можно судить об их узком распределении и, в частности, о преобладающем диаметре пор, который составляет 18 нм. На рисунке 3 изображен пример внешнего вида одного из полученных аэрогелей с разбавлением 1:14. По фотографии видно, что образец светопрозрачен.



**Рисунок 3 – Фотография  
светопроницаемого образца 1:14**

В результате работы были получены материалы с низкой плотностью, высокой площадью удельной поверхности и пористостью. По полученным результатам можно сделать вывод о том, что гидрофобизация способствует укреплению внутренней структуры материалов, вследствие чего снижается значение усадки. Кроме того, были получены светопроницаемые материалы с низким коэффициентом теплопроводности, который может быть использован при производстве высокоэффективной теплоизоляции. Такая изоляция особо важна при создании остеклений фасадов зданий на территориях с суровыми климатическими условиями.

*Исследование выполнено за счет гранта  
Российского научного фонда № 22-79-00154.*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Aerogels handbook: Advances in sol-gel derived materials and technologies / M. A. Aegerter, N. Leventis, M. A. Koebel. New York:Springer, 2011. 932 p.
2. Mahmoudpour M. et al. Carbon-based aerogels for biomedical sensing: Advances toward designing the ideal sensor // Advances in Colloid and Interface Science. 2021. Vol. 298. P. 102550.
3. Liu Y. et al. A self-prepared graphene oxide/sodium alginate aerogel as biological carrier to improve the performance of a heterotrophic nitrifier // Biochemical Engineering Journal. 2021. Vol. 171. P. 108027.
4. A scalable crosslinked fiberglass-aerogel thermal insulation composite / L. An, J. Wang, D. Petit et al. // Applied Materials Today. 2020. Vol. 21. P. 100843.