

ISSN 1561-8331 (Print)

ISSN 2524-2342 (Online)

УДК 543.54; 544.72; 544.46; 544.47:544.344; 548

<https://doi.org/10.29235/1561-8331-2018-54-3-274-280>

Поступила в редакцию 27.03.2018

Received 27.03.2018

Т. Ф. Кузнецова, А. И. Иванец, Ю. Д. Савка

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

АДСОРБЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ТИТАНОКРЕМНИЕОКСИДНЫХ МЕМБРАН НА КЕРАМИЧЕСКОЙ ПОДЛОЖКЕ

Аннотация. Титанокремниеоксидные мембраны на пористой кварцевой подложке получены путем его прямого контакта с металлосиликатным золем при различном соотношении Ti/Si в условиях осаждения коагеля и присутствия хлорида цетилпиридиния. Исследование текстурных и адсорбционных свойств мембран осуществлено с помощью низкотемпературной адсорбции–десорбции азота, включая методы *DFT* и *t*-графика. Показано, что полученные мембраны имеют мезопористую структуру с удельной поверхностью и гидравлическим диаметром пор, варьируемыми в интервалах 64–217 м²/г и 4–11 нм соответственно. Развитая площадь поверхности сохраняется вплоть до эквимолярного соотношения Ti/Si.

Ключевые слова: мембраны, керамика, коагель, низкотемпературная адсорбция–десорбция азота, удельная поверхность, мезопоры

Для цитирования. Кузнецова, Т. Ф. Адсорбционные свойства титанокремниеоксидных мембран на керамической подложке / Т. Ф. Кузнецова, А. И. Иванец, Ю. Д. Савка // Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. хим. наук. – 2018. – Т. 54, № 3. – С. 274–280. <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2018-54-3-274-280>

T. F. Kouznetsova, A. I. Ivanets, J. D. Sauka

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

ADSORPTION PROPERTIES OF TITANIA-SILICA MEMBRANES OBTAINED ON CERAMIC SUBSTRATE

Abstract. Titania-silica membranes on a porous quartz substrate are prepared by its direct contact with metal silicate sol at various Ti/Si ratios in the conditions of coagel sedimentation and presence of cetylpyridinium chloride. The study of textural and adsorption properties of membranes is conducted by low-temperature nitrogen adsorption-desorption, including methods of *t*-plots and *DFT* theory. It was shown that obtained membranes have mesoporous structure with the specific surface area and pore hydraulic diameter varied in intervals of 64–217 m²/g and 4–11 nm, respectively. Developed values of surface area remain up to molar ratio of Ti/Si = 50/50.

Keywords: membranes, ceramics, coagel, low-temperature nitrogen adsorption- desorption, specific surface area, mesopores

For citation. Kouznetsova T. F., Ivanets A. I., Sauka J. D. Adsorption properties of titania-silica membranes obtained on ceramic substrate. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya khimichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical series*, 2018, vol. 54, no.3, pp. 274–280 (In Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2018-54-3-274-280>

Введение. После накопления определенного опыта в формировании тонких слоев SiO₂, Al₂O₃, ZrO₂, TiO₂ с помощью золь-гель процессов [1–3] создание композиционных мембран на основе мезопористых неорганических материалов стало быстро развивающейся областью мембранного материаловедения [4]. При проведении жидкофазных процессов до сих пор не представляется возможным связать межмолекулярные взаимодействия и свойства компонентов в объемном растворе с поведением того же раствора в адсорбированном состоянии [5]. Более того, несмотря на определенные достижения в данной области, существует проблема формирования пористых тел в геометрически стесненных условиях, когда низкомолекулярные формы адсорбционной фазы расходуются на образование новых глобул и зарастание пространства между ними [6, 7].

Ранее нами было изучено формирование титанокремниевооксидного геля при прямом контакте кварцевой матрицы с алкоксидной смесью Ti(IV) и Si(IV) в условиях кислотного гидролиза [8, 9]. Полученные приповерхностные сложнооксидные образования отличались от титанооксидных и кремнеземных мембран, однако по бимодальности распределения мезопор являлись поверхностными аналогами объемного материала, что связывалось со специфическими условиями осаждения в кислой среде, различиями в скоростях гидролиза и поликонденсации и отсутствием процессов образования и переноса низкомолекулярных форм на стадии получения золя. В настоящей работе для получения золь-гель методом мембран на пористом кварцевом субстрате использовали ранее установленный матричный эффект органического катиона в смешанном титаносиликатном золе, полученном путем гидролиза сульфата титанила и тетраэтоксисилана [10, 11].

Цель работы – формирование пористых мембран на макропористом субстрате при осаждении титанокремниевооксидной адсорбционной фазы. Выбор титаносиликата в качестве адсорбционной фазы обусловлен высокой селективностью данной системы при поглощении радионуклидов стронция и цезия, а также перспективностью его применения в качестве гетерогенного катализатора в реакциях окисления органических веществ.

Экспериментальная часть. Получение титаносиликатных мембран осуществляли погружным методом путем прямого контакта макропористых керамических трубок из спеченного кварцевого порошка с мембранообразующим раствором в условиях золь-гель-перехода. Для получения стабильного титанооксидного золя сульфат титанила растворяли в дистиллированной воде (рН полученного раствора 1,0), после чего проводили гидролиз вещества введением аммиака до значения рН 7,5 с последующей пептизацией отмытого осадка 2 М раствором азотной кислоты при рН 1,8–2,0.

Силиказоль готовили из ТЭОС путем его гидролиза соляной кислотой в изопропанол. Тетраэтоксисилан, изопропанол и воду в молярных соотношениях 1 : 4 : 16 перемешивали в течение 1 ч до образования золя. В качестве супрамолекулярного темплата использовали хлорид цетилпиридиния в виде 5,0%-ного раствора. Смешанные титанокремниевооксидные золи в молярных соотношениях Ti/Si = 5/95, 15/85, 30/70, 50/50, 85/15 оставляли застудневать в течение 5 сут, что соответствовало суммарному времени протекания реакции в исходном силиказоле. Обработанные кварцевые трубки извлекали из золя и высушивали сначала при комнатной температуре, затем в сушильном шкафу при 393 К, после чего прокаливали на воздухе при 923 К в течение 2 ч.

Полученные образцы мембран исследовали методом низкотемпературной адсорбции–десорбции на анализаторе площади поверхности и пористости ASAP 2020 MP. Из изотерм адсорбции–десорбции азота рассчитывались значения удельной площади поверхности, объема, диаметра и распределения пор по размерам. Удельные поверхности определяли методами BET (A_{BET}), площадь внешней поверхности (A_{ext}) – сравнительным методом t -графика, гидравлический диаметр пор в диапазоне от 1,7 до 300 нм, а также адсорбционный и десорбционный объемы (V_{BJHads} и V_{BJHdes}) пор того же диапазона – методом BJH (Барретта–Джойнер–Халенды). Для описания текстуры применяли модель DFT (теории функционала плотности).

Анализ изменений площади поверхности композитной мембраны при модификации титанокремниевооксидным золем различного состава проводили с помощью сравнительного метода t -графика. Данный метод анализа [6, 12] важен для модифицированной керамики, поверхность которой меняется при нанесении активных титаносиликатных компонентов [13]. Компоненты либо покрывают часть поверхности, либо блокируют активные центры, либо создают центры специфической адсорбции, что в совокупности приводит к изменению адсорбционного потенциала матрицы и влияет на изотерму адсорбции [14]. Преимуществом сравнительного метода определения удельной поверхности перед методом BET является то, что первый основан на прямом сопоставлении приращений адсорбции, а второй использует суммарные величины, в том числе на всех предшествующих стадиях. В качестве стандартной изотермы адсорбции использовали изотерму, измеренную на непористом оксиде кремния (IV) ТК-800 II (фирмы Degussa) с удельной поверхностью по BET 163 м²/г.

В методе t -графика зависимой переменной, откладываемой на оси ординат, является средняя толщина t адсорбционной пленки, определенная по уравнению Гаркинса–Юры [15]:

$$t = (n/n_m)\sigma, \quad (1)$$

где n/n_m – число монослоев в пленке; n_m – емкость монослоя; σ – толщина одного слоя, равная для азота при 77 К 0,354 нм.

Анализируемую изотерму перестраивали в t -график в виде функции $n = f(t)$. Замена p/p_0 на t позволяла проводить сравнение изотермы и стандартной t -кривой. Если по форме изотерма идентична стандартной, t -график имеет вид прямой, проходящей через начало координат с тангенсом угла наклона n_m/σ , пропорциональным площади поверхности. Площадь поверхности, определенная t -методом, составляет, согласно [6]:

$$A_{\text{ext}} = 3,45 \cdot 10^4 (n_m / \sigma). \quad (2)$$

Площадь поверхности A_{micro} микропор в расчете на единицу массы твердого тела могла быть оценена только при условии, что $A_{\text{BET}} > A_{\text{ext}}$ [16], как разность удельной поверхности по BET и внешней площади поверхности A_{ext} , вычисленной t -методом:

$$A_{\text{micro}} = A_{\text{BET}} - A_{\text{ext}}. \quad (3)$$

Результаты и их обсуждение. Из рис. 1 видно, что сравнительные t -графики 1–5 отсекают на оси ординат отрицательные отрезки, соответствующие понижению адсорбционного потенциала поверхности образцов с ростом содержания титана в результате заполнения части активных центров титаносиликатом. Чем больше площадь поверхности, тем эти участки заметнее.

Для образцов 1–5 значения A_{BET} , A_{ext} , A_{BHDads} возрастают в последовательности $5 < 4 < 1 < 3 < 2$ (таблица). Для величины A_{BHDdes} наблюдается близкая последовательность: $5 < 4 \approx 1 < 3 < 2$. Сначала при введении малых количеств титана (IV) площадь поверхности несколько увеличивается, а затем по достижении соотношения Ti/Si = 15/85 начинает снижаться. Можно допустить, что при Ti/Si > 15/85 в мембранах полностью блокируются места с наибольшим адсорбционным потенциалом, и адсорбция азота при малых p/p_0 происходит только на оставшихся участках с меньшим адсорбционным потенциалом. Это приводит к изменению начальной формы изотермы и снижению площади поверхности, рассчитываемой в рамках теории BET (рис. 2). При этом внешняя поверх-

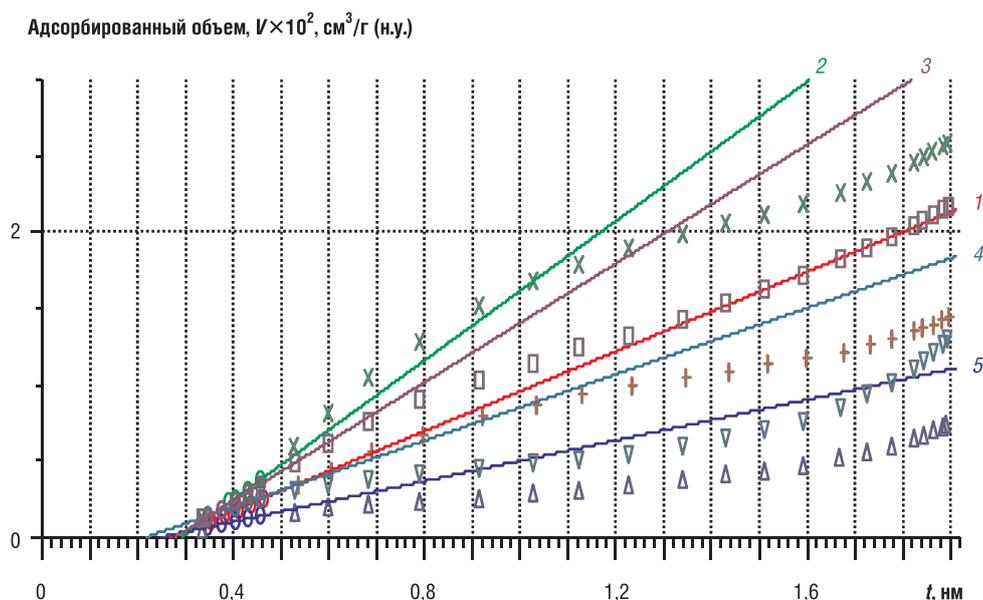


Рис. 1. Сравнительные t -графики титанокремневооксидных мембран при различном соотношении Ti/Si в золях в области полимолекулярной адсорбции: 1 – 5/95; 2 – 15/85; 3 – 30/70; 4 – 50/50; 5 – 85/15

Fig. 1. Comparative t -plots of titania-silica membranes at various ratios of Ti/Si in sols: 1 – 5/95; 2 – 15/85; 3 – 30/70; 4 – 50/50; 5 – 85/15, – in the area of polymolecular adsorption

Удельная поверхность и гидравлический диаметр пор, по *ВЖ*,
титанокремниевооксидных мембран

Specific surface and hydraulic pore diameter, according to *ВЖ*, of titania-silica membranes

Номер образца	Ti/Si	A_{BET} м ² /г	A_{ext} м ² /г	$A_{ВЖads}$ м ² /г	$A_{ВЖdes}$ м ² /г	$D_{ВЖads}$ нм	$D_{ВЖdes}$ нм
1	5/95	122	202	148	197	6,2	4,5
2	15/85	217	353	284	260	4,0	8,6
3	30/70	187	301	202	257	6,8	5,2
4	50/50	103	168	71	198	11,0	7,6
5	85/15	64	103	48	74	9,9	6,2

ность A_{ext} превышает A_{BET} в 1,5–1,6 раза, что подтверждает отсутствие микропор во всех образцах 1–5 (таблица, рис. 2).

Согласно рис. 3 и 4, объем пор для образцов 1–5 уменьшается в ряду $5 < 4 < 1 < 3 < 2$, причем их текстура преимущественно мезопористая, в отличие от полученных ранее объемных аналогов в виде ксерогелей, которые имеют микромезопористую структуру и достигают значений A_{BET} и A_L (рассчитанная в рамках теории Ленгмюра) до 660 и 890 м²/г, а A_{micro} и A_{ext} – до 450 и 470 м²/г соответственно [10].

Можно предположить, что стабилизация наноразмерных частиц оксида титана (IV) аморфными прослойками силикагеля сохраняет текстуру титаносиликатных ксерогелей от ее полного сжатия и коалесценции частиц в процессе термообработки. Согласно *DFT*-распределениям пор по размерам, преобладающие диаметры пор объемных образцов изменяются в интервале от 3 до 10 нм [10]. Вид капиллярно-конденсационного гистерезиса на изотермах адсорбции–десорбции азота свидетельствует, что поры в объемных образцах имеют в основном «бутылкообразную» форму. Это позволяет предположить, что с ростом содержания титана (IV) до значения Ti/Si = 85/15 в процессе десорбции адсорбата происходит блокирование горловин пор.

В отличие от объемных ксерогелей с микромезопористой текстурой, поверхностные аналоги титаносиликатов имеют мезопористую текстуру, описываемую изотермами типа IV с петлей гистерезиса H3, характерной для разупорядоченной структуры с порами шелевидной формы. По-видимому, при формировании мембраны в «ограниченном» пористом пространстве

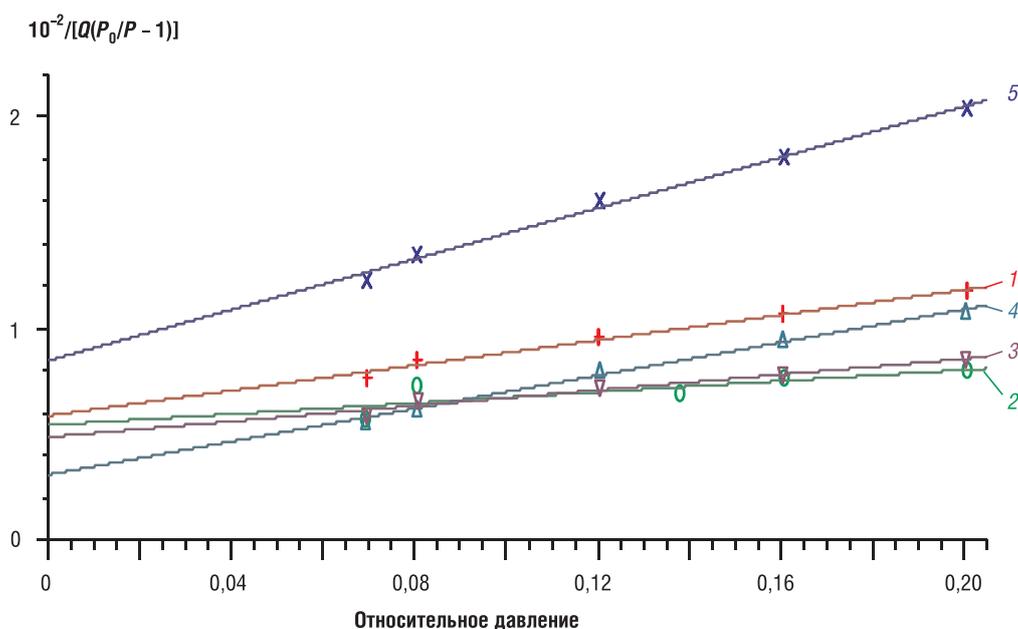


Рис. 2. Линейные БЭТ-графики титанокремниевооксидных мембран при различном соотношении Ti/Si в золях: 1 – 5/95; 2 – 15/85; 3 – 30/70; 4 – 50/50; 5 – 85/15

Fig. 2. Linear *BET*-plots of titania-silica membranes at various ratios of Ti/Si in sols: 1 – 5/95; 2 – 15/85; 3 – 30/70; 4 – 50/50; 5 – 85/15

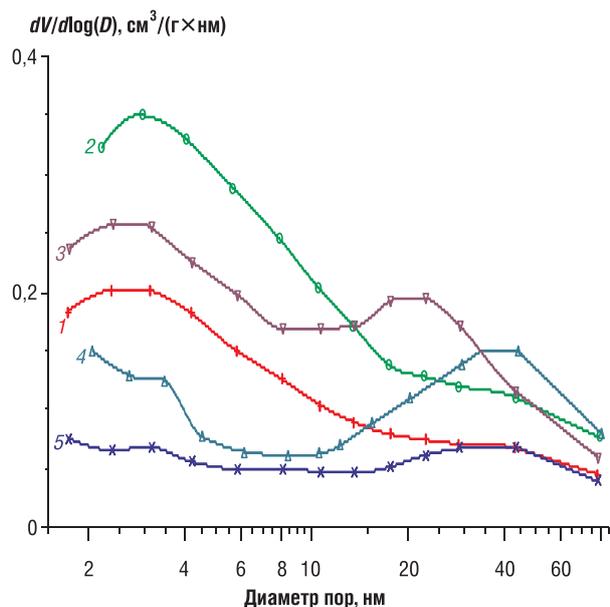


Рис. 3. Логарифмические кривые *BJH*-распределения пор по размерам титанокремневооксидных мембран при различном соотношении Ti/Si в золях: 1 – 5/95; 2 – 15/85; 3 – 30/70; 4 – 50/50; 5 – 85/15

Fig. 3. Logarithmic curves of pore size *BJH*-distribution of titania-silica membranes at various ratios of Ti/Si in sols: 1 – 5/95; 2 – 15/85; 3 – 30/70; 4 – 50/50; 5 – 85/15

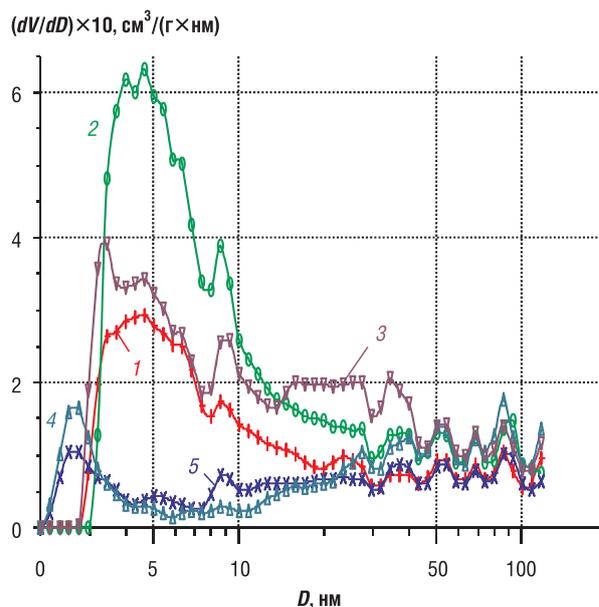


Рис. 4. Кривые *DFT*-распределения пор по размерам титанокремневооксидных мембран при различном соотношении Ti/Si в золях: 1 – 5/95; 2 – 15/85; 3 – 30/70; 4 – 50/50; 5 – 85/15

Fig. 4. Pore size *DFT*-distribution of titania-silica membranes at various ratio of Ti/Si in sols: 1 – 5/95; 2 – 15/85; 3 – 30/70; 4 – 50/50; 5 – 85/15

макропористого субстрата общие физико-химические механизмы формирования титаносиликатной адсорбционной фазы золь-гель методом с его разделенными во времени стадиями золь- и гелеобразования маскируются осаждением через коагель, где эти стадии проходят одновременно в одном и том же «реакторе». Скорее всего, при осаждении титаносиликата на макропористом субстрате, погруженном в титаносиликатный золь, образуется коллоидная смесь, по мере того как ионы металла адсорбируются гелеобразным кремнеземом. Можно считать, что коллоидный титаносиликат состоит из смешанных микрогетерогенных образований, в которых гидроксиды кремния (IV) и титана (IV) присутствуют в виде удерживаемых вместе коллоидных частиц. Такие частицы, скорее всего, формируются как коагель в результате взаимной коагуляции отрицательно и положительно заряженных коллоидных частиц кремнезема и оксида титана (IV) соответственно. Помимо выравнивания поверхности матрицы, данный процесс сопровождается эффектом снижения площади поверхности титаносиликатной мембраны.

С ростом соотношения Ti/Si осаждение больших количеств низкомолекулярных форм в ограниченном объеме матрицы приводит к случайной упаковке кремниево- и титаноокислородных тетраэдров с образованием между ними пор, недоступных для крупных молекул и обладающих в перспективе молекулярно-ситовыми свойствами. В области молекулярно-ситового соответствия, т.е. приближения размеров молекул к размерам пор, может наблюдаться резкий спад диффузии и скорости сорбции при практически сходных объемах сорбционного пространства. При этом для очень крупных молекул, например полимеров, такую роль могут играть крупные мезопоры или даже макропоры. Исходя из этого, пористость адсорбционной фазы в «сжатых» условиях макропористой матрицы можно в перспективе использовать для управления молекулярно-ситовыми свойствами характеристики композиционных сорбентов, а также явлениями внутридиффузионного переноса.

Выводы. В отличие от титанокремневооксидных ксерогелей формирование их поверхностных аналогов в виде мембран с молярным соотношением $5/95 \leq \text{Ti/Si} \leq 85/15$ приводит к существенному снижению удельной поверхности, исчезновению микропор и формированию мезопор. При одном и том же суммарном времени протекания реакции создание сильно агрегированных мембран связано с возрастанием скорости конденсации смешанных титанокремневооксидных

золей и снижением удельной площади поверхности. Методами *t*-графика, *BJH*- и *DFT*-распределения мезопор по размерам показано, что развитая площадь поверхности титанокремниевооксидных мембран, т.е. > 100 м²/г, сохраняется вплоть до эквиволярного соотношения Ti/Si. Наиболее развитой поверхностью характеризуются мембраны, полученные из титаносиликатного золя при соотношении Ti/Si = 15/85.

Благодарности. Работа выполнена при частичной поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект X15УК/А-037).

Acknowledgements. This work has been performed with the partial financial support of the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research (project №X15УК/А-037).

Список использованных источников

1. Kaiser, K. Generation of SiO₂-membranes from alkoxy silanes on porous supports / K. Kaiser, H. Schmidt // *J. Non-Cryst. Solids*. – 1984. – Vol. 63, № 1–2. – P. 261–271. [https://doi.org/10.1016/0022-3093\(84\)90405-8](https://doi.org/10.1016/0022-3093(84)90405-8)
2. Silica membranes by the sol-gel process / A. Larbot [et al.] // *J. Membr. Sci.* – 1989. – Vol. 44. – P. 289–303. [https://doi.org/10.1016/s0376-7388\(00\)83359-1](https://doi.org/10.1016/s0376-7388(00)83359-1)
3. Schmidt, H. Principles of hydrolysis and condensation reaction of alkoxy silanes / H. Schmidt, H. Scholze, A. Kaiser // *J. Non-Cryst. Solids*. – 1984. – Vol. 63, № 1–2. – P. 1–11. [https://doi.org/10.1016/0022-3093\(84\)90381-8](https://doi.org/10.1016/0022-3093(84)90381-8)
4. Мембраны и нанотехнологии / В. В. Волков [и др.] // *Российские нанотехнологии*. – 2008. – Т. 3, № 11–12. – С. 67–99. <https://doi.org/10.1134/s1995078008110025>
5. Дерягин, Б. В. Теория устойчивости коллоидов и тонких пленок / Б. В. Дерягин. – М.: Наука, 1986. – 204 с.
6. Фенелонов, В. Б. Введение в физическую химию формирования супрамолекулярной структуры адсорбентов и катализаторов / В. Б. Фенелонов. 2-е изд., испр. и доп. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2004. – 442 с.
7. Дубинин, М. М. Адсорбция и пористость / М. М. Дубинин. – М.: Наука, 1972. – 127 с.
8. Effect of quartz substrate on adsorption and texture properties of titanium-containing silica membranes / A. I. Ivanets [et al.] // *Russian J. Appl. Chem.* – 2013. – Vol. 86, № 6. – P. 893–898 <https://doi.org/10.1134/s1070427213060189>
9. Кузнецова, Т. Ф. Адсорбционные свойства ксерогеля, полученного из смеси алкоксидов титана и кремния / Т. Ф. Кузнецова, С. И. Еременко // *Коллоид. журн.* – 2015. – Т. 77, № 4. – С. 1–8.
10. Kuznetsova, T. F. Formation of titanosilicate precursors of an active adsorption phase / T. F. Kuznetsova, A. I. Ivanets, L. L. Katsoshvili // *Russian J. of Physical Chemistry A*. – 2017. – Vol. 91, № 4. – P. 744–748. <https://doi.org/10.1134/s0036024417040136>
11. Sol-gel route to synthesize titania-silica nano precursors for photoactive particulates and coatings / V. S. Smitha [et al.] // *J. of Sol-Gel Science Technology*. – 2010. – Vol. 54. – P. 203–211.
12. Грег, С. Адсорбция, удельная поверхность, пористость / С. Грег, К. Синг. – М.: Мир, 1984. – 306 с.
13. Ролдугин, В. И. Физикохимия поверхности / В. И. Ролдугин. – Долгопрудный: Интеллект, 2000. – 216 с.
14. Kiselev, A. V. Adsorption properties of hydrophobic surfaces / A. V. Kiselev // *J. Colloid Interface Sci.* – 1968. – Vol. 28, № 3. – P. 430–442. [https://doi.org/10.1016/0021-9797\(68\)90074-x](https://doi.org/10.1016/0021-9797(68)90074-x)
15. Harkins, W. D. An Adsorption Method for the Determination of the Area of a Solid without the Assumption of a Molecular Area, and the Area Occupied by Nitrogen Molecules on the Surfaces of Solids / W. D. Harkins, G. Jura // *J. of Chemical Physics*. – 1943. – Vol. 11. – P. 431. <https://doi.org/10.1063/1.1723871>
16. Cranston, R. The Determination of Pore Structures from Nitrogen Adsorption Isotherms / R. Cranston, F. Inkley // *Advances in Catalysis*. – 1957. – Vol. 9. – P. 143–154. [https://doi.org/10.1016/s0360-0564\(08\)60163-7](https://doi.org/10.1016/s0360-0564(08)60163-7)

References

1. Kaiser K., Schmidt H. Generation of SiO₂-membranes from alkoxy silanes on porous supports. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 1984, vol. 63, no 1–2, pp. 261–271. [https://doi.org/10.1016/0022-3093\(84\)90405-8](https://doi.org/10.1016/0022-3093(84)90405-8)
2. Larbot A., Julbe A., Guizard C., Cot L. Silica membranes by the sol-gel process. *Journal of Membrane Science*, 1989, vol. 44, no 2–3 pp. 289–303. [https://doi.org/10.1016/s0376-7388\(00\)83359-1](https://doi.org/10.1016/s0376-7388(00)83359-1)
3. Schmidt H., Scholze H., Kaiser A. Principles of hydrolysis and condensation reaction of alkoxy silanes. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 1984, vol. 63, no 1–2, pp. 1–11. [https://doi.org/10.1016/0022-3093\(84\)90381-8](https://doi.org/10.1016/0022-3093(84)90381-8)
4. Volkov V. V., Mchedlishvili B. V., Roldugin V. I., Ivanchev S. S., Yaroslavtsev A. B. Membranes and nanotechnologies. *Nanotechnologies in Russia*, 2008, vol. 3, no. 11–12, pp. 656–687 (in Russian) <https://doi.org/10.1134/s1995078008110025>
5. Deryagin B. V. *The theory of stability of colloids and thin films*. Moscow, Nauka Publ., 1986. 204 p. (in Russian).
6. Fenelonov V. B. *Introduction to the physical chemistry of the formation of the supramolecular structure of adsorbents and catalysts*. Novosibirsk, Publishing House of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2004, 442 p. (in Russian).
7. Dubinin M. M. *Adsorption and porosity*. Moscow, Nauka Publ., 1972. 127 p. (in Russian).
8. Ivanets A. I., Kuznetsova T. F., Prozorovich V. G., Eremenko S. I. Effect of quartz substrate on adsorption and texture properties of titanium-containing silica membranes. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 2013, vol. 86, no. 6, pp. 893–898. <https://doi.org/10.1134/s1070427213060189>

9. Kuznetsova T. F., Eremenko S. I. Adsorption properties of xerogel prepared from mixed titanium and silicon alkoxides. *Colloid Journal*, 2015, vol. 77, no. 4, pp. 451–457. <https://doi.org/10.1134/s1061933x15040134>
10. Kuznetsova T. F., Ivanets A. I., Katsoshvili L. L. Formation of titanosilicate precursors of an active adsorption phase. *Russian Journal of Physical Chemistry A*, 2017, vol. 91, no. 4, pp. 744–748. <https://doi.org/10.1134/s0036024417040136>
11. Smitha, V. S., Manjumol, K. A., Baiju K. V. et al. Sol-gel route to synthesize titania-silica nano precursors for photo-active particulates and coatings. *Journal of Sol-Gel Science Technology*, 2010, vol. 54, pp. 203–211.
12. Greg S., Sing K. *Adsorption, Specific Surface, Porosity*. 2nd ed. Academic Press, 1982. 304 p.
13. Roldugin, V. I. *Physicochemistry of Surfaces*. Dolgoprudny, Publishing house Intellect, 2000. 216 p. (in Russian).
14. Kiselev A.V. Adsorption properties of hydrophobic surfaces. *Journal of Colloid Interface Science*, 1968, vol. 28, no. 3–4, pp. 430–442. [https://doi.org/10.1016/0021-9797\(68\)90074-x](https://doi.org/10.1016/0021-9797(68)90074-x)
15. Harkins W. D., Jura G. An Adsorption Method for the Determination of the Area of a Solid without the Assumption of a Molecular Area, and the Area Occupied by Nitrogen Molecules on the Surfaces of Solids. *Journal of Chemical Physics*, 1943, vol. 11, no 9, pp. 431–432. <https://doi.org/10.1063/1.1723871>
16. Cranston R., Inkley F. The Determination of Pore Structures from Nitrogen Adsorption Isotherms. *Advances in Catalysis*, 1957, vol. 9, pp. 143–154. [https://doi.org/10.1016/s0360-0564\(08\)60163-7](https://doi.org/10.1016/s0360-0564(08)60163-7)

Информация об авторах

Кузнецова Татьяна Федоровна – канд. хим. наук, доцент, ст. науч. сотрудник, Институт общей и неорганической химии, Национальная академия наук Беларуси (ул. Сурганова, 9/1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: kouzn@igic.bas-net.by, tatyana.fk@gmail.com

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

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

Information about the authors

Tatsiana F. Kuznetsova – Ph. D. (Chemistry), Associate Professor, Senior researcher, Institute of General and Inorganic Chemistry, National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Sarganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: kouzn@igic.bas-net.by, tatyana.fk@gmail.com

Andrey I. Ivanets - Ph. D. (Chemistry), Associate Professor, Head of the Laboratory, Institute of General and Inorganic Chemistry, National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Sarganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: andreiiivanets@ya.ru

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