



ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Научная статья

УДК 543.54:544.72:661.78

doi: 10.17308/sorpchrom.2025.25/13285

Использование волокнистых и гранулированных ионитов для получения микро- и нанодисперсий диоксида кремния

Ирина Михайловна Кимленко¹✉, Татьяна Александровна Савицкая¹,
Юлия Алексеевна Столбунова¹, Янина Александровна Косенок²,
Владимир Евгеньевич Гайшун²

¹Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь, kimlenka@bsu.by✉

²Гомельский государственный университет имени Ф.Скорины, Гомель, Беларусь

Аннотация. Работа посвящена получению микро- и нанодисперсий диоксида кремния с помощью волокнистых и гранулированных ионитов. Эксперименты проводили с помощью катионита КУ-2-8, сульфоугля, катионита ФИБАН К-1 и древесной (хвойной) сульфатной целлюлозы, модифицированной ранее авторами путем фосфорилирования. При получении дисперсий SiO_2 использовали системы на основе жидкого стекла и дистиллированной воды с массовой долей SiO_2 3, 6, 10, 20 и 30%. Получение кремнезолей методом ионного обмена проводили в статическом и динамическом режимах. С целью изучения особенностей поведения кремнезолей, полученных в динамическом режиме, оценивали изменение величины кинематической вязкости образцов в течение 2 месяцев после их получения. Дополнительно проводили эксперименты с регенерированным 10% H_2SO_4 и промытым до нейтрального pH катионитом КУ-2-8. Устойчивость кремнезолей оценивали визуально и турбидиметрически. Размер частиц полученных образцов определяли методом лазерной дифракции, морфологию поверхностей ксерогелей SiO_2 изучали методом сканирующей электронной микроскопии. Результаты ИК-спектроскопии свидетельствуют о наличии в полученных образцах полос, в целом характерных для аморфного гидроксилированного кремнезема. Показано, что наиболее устойчивые дисперсии образуются при использовании систем «жидкое стекло-вода» с массовой долей SiO_2 , равной 6%, а размер частиц зависит от типа используемого ионита. Установлено, что волокнистые катиониты позволяют получать коллоидные системы с меньшим размером частиц и большей однородностью по сравнению с гранулированными. Показано, что модифицированная целлюлоза является перспективным материалом для получения нанодисперсий диоксида кремния. Продемонстрирована возможность использования не только исходного, но и регенерированного катионита, что выгодно с экономической точки зрения. Показано, что преимуществом получения кремнезолей в динамическом режиме является возможность управления вязкостью растворов посредством отбора его определенного объема на выходе из ионообменной колонки. Практическая значимость полученных результатов заключается в расширении номенклатуры полирующих композиций на основе SiO_2 с целью их применения в электронной промышленности для химико-механической полировки полупроводниковых пластин, что позволит в будущем отказаться от дорогостоящих импортных материалов и снизить затраты на производство конечной продукции.

Ключевые слова: диоксид кремния, жидкое стекло, дисперсии, ионный обмен, ФИБАН, сульфокатионит, сульфоуголь, хвойная целлюлоза

Благодарности: работа выполнена в рамках ГПНИ «Химические процессы, реагенты и технологии, биорегуляторы и биооргхимия» (НИР 2.1.04.06.6)

Для цитирования: Кимленко И.М., Савицкая Т.А., Столбунова Ю.А., Косенок Я.А., Гайшун В.Е. Использование волокнистых и гранулированных ионитов для получения микро- и нанодисперсий диоксида кремния // Сорбционные и хроматографические процессы. 2025. Т. 25, № 4. С. 576-585. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2025.25/13285>



Original article

Use of fibrous and granular ion exchangers for obtaining micro- and nanodispersions of silica

Iryna M. Kimlenka¹✉, Tatsiana A. Savitskaya¹, Yulia A. Stalbunova¹,
Yanina A. Kasenok², Vladimir E. Gaishun²

¹Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus, kimlenka@bsu.by✉

²Gomel State University named after F. Skoriny, Gomel, Republic of Belarus

Abstract. The article is devoted to obtaining micro- and nanodispersions of silica using fibrous and granular ionites. Experiments using cationite KY-2-8, sulfocarbon, Fiban K-1 and wood (coniferous) sulfate cellulose previously modified by the authors by phosphorylation have been carried out. Systems based on liquid glass and distilled water containing 3, 6, 10, 20 and 30% (by weight) SiO_2 were used for the experiments. Silica sols were obtained by the ion exchange method in static and dynamic modes with different ratio “liquid glass : ionite”. In order to study the behavior peculiarities of silica sols obtained in dynamic mode the kinematic viscosity changing was estimated within 2 months after their preparation. Additionally, experiments using cationite KY-2-8 regenerated with 10 % H_2SO_4 followed by washing to neutral pH have been carried out. The silica sols stability was estimated visually and by turbidimetric method. The particle size of obtained samples was determined by laser diffraction method, the morphology of xerogels SiO_2 was studied by scanning electron microscopy. The results of IR-spectroscopy indicate the presence of bands generally characteristic of amorphous hydroxylated silica in obtained samples. It has been shown that more stable dispersions based on “liquid glass –water” systems containing 6% (by weight) SiO_2 were formed. It has been found that the particle size of silica sols depended on the ionite type: fibrous cationites allowed obtaining colloidal systems with a smaller particle size and greater homogeneity compared to granular ones. It has been shown that modified cellulose was a promising material for obtaining nanodispersions of silica. The possibility of regenerated cationite using has been demonstrated. The latter is an advantage from an economic point of view. It has been shown that the viscosity of solutions when silica sols obtaining in dynamic mode could be managed by taking a certain volume of solution at the outlet of ion exchange column. The practical significance of obtained results lies in the expansion of range of polishing compositions based on SiO_2 for their application in electronic industry for chemical-mechanical polishing of semiconductor wafers. It makes possible to abandon expensive imported materials in the future and to reduce the cost of final product manufacturing.

Keywords: silica, liquid glass, dispersions, ion exchange, Fiban, sulfocationite, sulfocoal, softwood cellulose

Acknowledgments: the investigation has been carried out within the State Program of Research “Chemical Processes, Reagents and Technologies, Bioregulators and Bioorganic Chemistry” (project 2.1.04.06.6)

For citation: Kimlenka I.M., Savitskaya T.A., Stalbunova Y.A., Kasenok Y.A., Gaishun V.E. Use of fibrous and granular ion exchangers for obtaining micro- and nanodispersions of silica. *Sorbtionnye i khromatograficheskie protsessy*. 2025. 25(4): 576-585. (In Russ.). <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2025.25/13285>

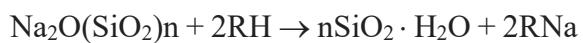
Введение

В настоящее время общемировая потребность в материалах на основе диоксида кремния остается стабильно высокой. По данным [1] объем производства различных форм аморфного кремнезема в мире составляет ~4 млн. тонн, в том числе происходит расширение использования SiO_2 в форме золей и ультрадисперсных порошков в высокотехнологичных отраслях. К числу основных потребителей кремнезема относится электронная промышленность. Он применяется, в

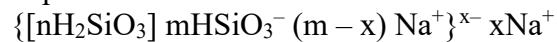
частности, в качестве компонента полирующих композиций для обработки пластин монокристаллического кремния [2, 3]. Получению и изучению свойств композиций на основе диоксида кремния для различных применений посвящено большое число исследований, в особенности золь-гель методу синтеза коллоидного диоксида кремния [4-9], изучению влияния различных факторов на его структуру и свойства [10-12]. В настоящее время важное практическое применение для получения кремнезолей нашел также метод ионного обмена [2,13,14]. Благодаря спо-

собности к неограниченной полимеризации поликремневые кислоты образуют коллоидные растворы (кремнезоли) в широких интервалах концентраций SiO_2 и дисперсности. При ионообменном получении кремнекислоты первоначально образуется пересыщенный раствор мономерной кислоты, затем происходят процессы полимеризации путем поликонденсации, скорость которых зависит от состава и температуры раствора [13].

Реакция ионного обмена между жидким стеклом и Н-катионитом, в результате которой образуется коллоидный раствор кремниевой кислоты, в общем виде может быть записана как:



Строение мицелл образующегося кремнезоля, агрегат которых составляют нерастворимые молекулы кремниевой кислоты, можно представить следующим образом:



Метод ионного обмена отличается простотой, а жидкое стекло, применяемое при приготовлении кремнезолей, является доступным и дешевым сырьем, что позволяет отнести данный метод к ресурсо- и энергосберегающим. Кроме того, возможно использование широкого спектра ионитов различного типа, среди которых особое место занимают ионообменные волокнистые материалы. Установлено, что они обладают многими преимуществами перед гранулированными аналогами. Например, волокнистый сульфокатионит ФИБАН К-1 в отличие от гранулированного КУ-2-8 может использоваться в тонком слое (7 мм) при высоких скоростях водных растворов [15].

Целью настоящей работы явилось получение микро- и нанодисперсий диоксида кремния с помощью ионитов различного вида.

Экспериментальная часть

В настоящей работе в качестве исходных материалов для получения кремнезолей использовали жидкое натриевое

стекло GOODHIM (Россия), соответствующее ГОСТ 13078-2021, гранулированные (КУ-2-8, сульфоуголь) и волокнистые катиониты (ФИБАН К-1, модифицированная ранее нами древесная (хвойная) сульфатная целлюлоза [16], фосфорилирование которой было осуществлено в соответствии с методикой [17]).

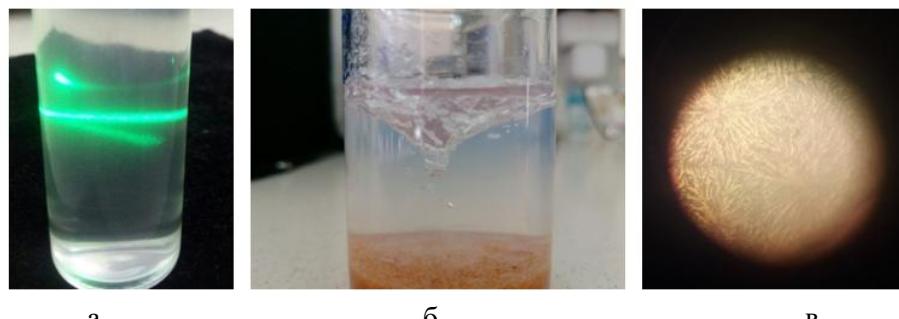
Используемое жидкое стекло представляло собой прозрачную густую жидкость без механических включений и примесей, видимых невооруженным глазом, с небольшим эффектом опалесценции при пропускании через нее узкого пучка света, свидетельствующего о присутствии в системе помимо силиката натрия коллоидного SiO_2 . По методике, рекомендованной ГОСТ 13078-2021, определена массовая доля SiO_2 , которая составила 30%, и pH, равный 10.

Основные характеристики использованных ионообменных материалов представлены в таблице 1. Обменная емкость ионообменного материала на основе фосфорилированной сульфатной целлюлозы была определена с помощью ионного хроматографа Metrohm 850 Professional IC (Швейцария), а размер волокон – с помощью оптического микроскопа Carl Zeiss Jenna (Германия) в поляризованном свете при увеличении 320x.

Получение кремнезолей методом ионного обмена проводили с использованием исходного жидкого стекла и систем «жидкое стекло – дистиллированная вода» с соотношением компонентов 1 : 10, 1 : 5, 1 : 3, 1 : 1,5. Таким образом, массовая доля SiO_2 в исследуемых образцах составляла 3, 6, 10, 20 и 30%. Эксперименты проводили в статическом режиме (ионообменную смолу в H^+ -форме добавляли к жидкому стеклу при соотношении компонентов 1 : 10 соответственно) и динамическом (жидкое стекло пропускали через неподвижный слой катионита высотой 100 мм со скоростью 2 $\text{cm}^3/\text{мин}$ при диаметре ионообменной колонки 20 мм). Подготовку катионитов к работе с целью удаления органических

Таблица 1. Характеристика ионитов
Table 1. Characteristics of ion exchanger

Ионит	Производитель	Тип ионита, химический состав	Обменная емкость, мг-ЭКВ/г
Гранулированные катиониты			
КУ-2-8	ООО «Рециклинг Плюс» (РБ)	Сильнокислотный катионит, сополимер стирола с дивинилбензолом, эффективный размер гранул 0.40–0.55 мм	1.8
Сульфоуголь	LANXESS Deutschland GmbH	Сильнокислотный катионит, сульфированный каменный уголь, размер гранул 0.3-2.0 мм	не менее 2.4
Волокнистые катиониты			
ФИБАН К-1	Институт физико-органической химии НАН Беларуси (РБ)	Сильнокислотный катионит, полипропилен с привитым сополимером стирола и дивинилбензола, диаметр моноволокон ~ 40 мкм	2.5–3.2
Модифицированная целлюлоза	БГУ	Полифункциональный катионит, фосфат целлюлозы [16], диаметр волокон ~ 12.6 мкм	1.65



а – опалесцирующий раствор кремниевой кислоты, б – гель, образовавшийся спустя 2 суток при использовании системы «жидкое стекло – вода» с массовой долей SiO_2 , равной 3 %, в – микрофотография геля в поляризованном свете (увеличение 320x)

Рис. 1. Примеры полученных образцов на различных этапах эксперимента
Fig. 1. Examples of the obtained samples at various stages of the experiment

и минеральных примесей, внесенных при их производстве, осуществляли в соответствии с ГОСТ 10896-78. Дополнительно проводили эксперименты с использованным ранее катионитом КУ-2-8, регенерированным 10% H_2SO_4 с его последующей промывкой до нейтрального pH.

Образование золей контролировали по наличию конуса Тиндаля при пропускании узкого пучка света через образец, а их устойчивость – визуально и турбидиметрически путем измерения мутности через различные промежутки времени на

приборе Turbidimetr 2100N Hach (США). Результаты экспериментов представлены на рисунке 1 и в таблице 2.

С целью изучения особенностей поведения кремнезолей, полученных в динамическом режиме, оценивали изменение величины кинематической вязкости образцов в течение 2 месяцев после их получения с помощью капиллярного вискозиметра ВПЖ 4 – 1.12 (Россия). Анализировали серию образцов, которые были отобраны на выходе из ионообменной колонки через каждые 25 см^3 .

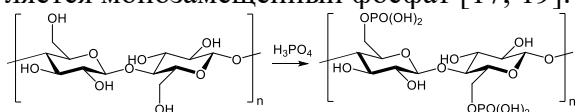
Определение размеров частиц полученных образцов проводили методом лазерной дифракции с помощью анализатора размеров частиц Mastersizer 3000 (Malvern Instruments Ltd, Великобритания). Все необходимые вычисления осуществлялись с помощью программного обеспечения «Malvern Instruments\Mastersizer 3000». Для расчетов была использована модель рассеяния Ми, показатель преломления дисперсионной среды (воды) был указан как 1.33, а показатель рассеяния частиц кремнезема – как 1.45.

ИК-спектры снимали с помощью ИК-Фурье спектрометра BRUKER (Германия) с рабочим диапазоном 4000-400 cm^{-1} .

Морфологию поверхностей ксерогелей SiO_2 , полученных в результате высушивания гелей, образовавшихся из исследуемых золей, изучали методом сканирующей электронной микроскопии на микроскопе СЭМ LEO 1420 (Германия) при увеличениях 1000x и 10000x.

Обсуждение результатов

Известно, что ионообменные материалы на основе целлюлозы обладают рядом преимуществ, включая возобновляемость исходного сырья, хорошие емкостные характеристики, возможность утилизации и др., что определяет их широкое использование [18, 19]. При этом фосфоросодержащие производные целлюлозы в ряде случаев имеют высокую селективность ионообменного действия, что позволяет их использовать для получения волокон с катионообменными свойствами. В настоящее время предложено много способов получения фосфоросодержащих производных целлюлозы. Одним из таких методов является ее фосфорилирование, которое преимущественно осуществляется по первичному гидроксилу, а основным продуктом реакции является монозамещенный фосфат [17, 19].



Важными преимуществами фосфата целлюлозы является его устойчивость к действию высоких температур, ионизирующего излучения, органических растворителей, а также возможность неоднократной регенерации.

ИК-спектры ксерогелей, образовавшихся из золей, полученных с помощью модифицированной нами целлюлозы и ФИБАН К-1 (рисунок 2), свидетельствуют в целом об идентичности образцов и наличии полос, характерных для аморфного гидроксилированного кремнезема. Полосы поглощения ~ 1055 и 790 cm^{-1} соответствуют асимметричным и симметричным валентным колебаниям связи Si-O-Si, 566 cm^{-1} – симметричным Si-O-Si колебаниям кремнекислородных тетраэдров силоксанов, 460 cm^{-1} – деформационным колебаниям связей Si-O-Si. Полоса 850 cm^{-1} соответствует деформационным колебаниям связей Si-OH, полосы 1670 и 3456 cm^{-1} принадлежат деформационным и валентным колебаниям молекул адсорбированной (и, вероятно, координационно связанной) воды соответственно [10, 21, 22]. Полученные результаты указывают на перспективность использования волокнистых ионитов отечественного производства для получения коллоидного SiO_2 .

Результаты наших исследований и авторов работы [4] демонстрируют существенное влияние соотношения компонентов в системе «жидкое стекло – вода» на устойчивость получаемых золей. Так, в случае массовой доли SiO_2 , равной 3 %, уже на вторые сутки наблюдается гелеобразование (рисунок 1б), что вероятно связано с гидролизом силиката натрия, имеющим место при разбавлении данного раствора водой и усиливающим эффект гелеобразования. С другой стороны, нами показано, что при увеличении массовой доли SiO_2 от 10 до 30% со временем происходит уменьшение мутности и тем больше, чем больше массовая доля SiO_2 (таблица 2), что, вероятно, связано с седиментацией частиц и свидетельствует о

Таблица 2. Мутность полученных систем после контакта со смолой КУ-2-8

Table 2. Turbidity of the obtained systems after contact with KU-2-8 resin

Массовая доля SiO_2 в системе «жидкое стекло- вода», %	Время контакта со смолой		
	1 ч	2 сут	4 сут
3	13.3	гель	н.а.
6	15.6	н.а.	40.0
10	18.3	н.а.	13.6
20	19.7	14.2	12.8
30	25.0	12.0	10.0

Примечание: н.а. – не анализировали

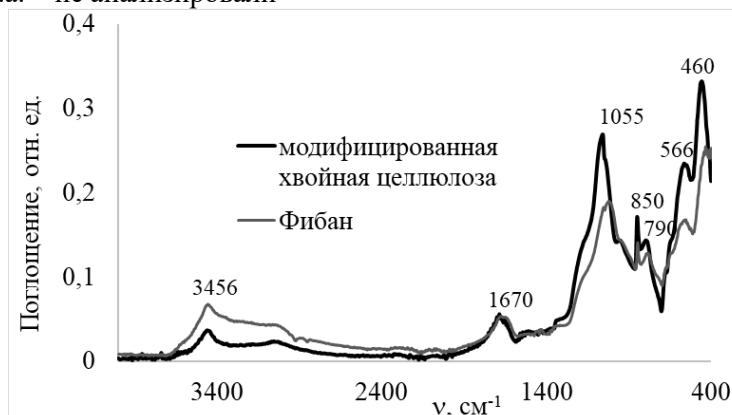


Рис. 2. ИК-спектры ксерогелей, образовавшихся из золей, полученных
с помощью волокнистых ионитов

Fig. 2. IR spectra of xerogels formed from sols obtained using fibrous ion exchangers

неустойчивости таких систем. Результаты определения размера частиц исследуемых систем, представленные на рисунке 3, также указывают на зависимость размера от массовой доли SiO_2 в жидким стекле. Нами установлено, что системы «жидкое стекло – вода» с массовой долей SiO_2 , равной 6%, позволяют получать дисперсии диоксида кремния с наименьшим значением размера частиц, которые сохраняют свою устойчивость в течение нескольких месяцев. Все последующие исследования проводились с использованием данных систем.

Кинематическая вязкость является мерой внутреннего сопротивления жидкости течению под действием гравитационных сил и определяется путем измерения времени в секундах, необходимого для того, чтобы фиксированный объем жидкости прошел известное расстояние под действием силы тяжести через капилляр в вискозиметре при строго контролируемом

температуре [20]. Результаты, представленные на рисунке 4, свидетельствуют, что образец, полученный на выходе из ионообменной колонки в начале эксперимента, по своему поведению существенно отличается от остальных, вязкость которых изменяется незначительно. Таким образом, преимуществом получения кремнезолей в динамическом режиме является возможность управления вязкостью растворов посредством отбора его определенного объема на выходе из ионообменной колонки.

Методом лазерной дифракции исследован дисперсный состав коллоидных систем, полученных с помощью различных ионитов. Результаты анализа, представленные в таблице 3 и на рисунках 5 и 6, свидетельствуют об относительной однородности полученных систем. При этом коэффициент полидисперсности для волокнистых ионитов меньше, чем для гранулированных, что находит отражение в

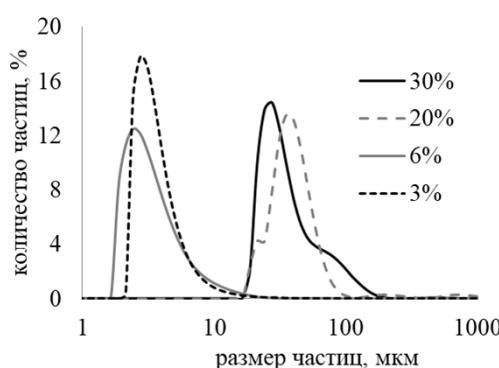


Рис. 3. Кривые распределения по размерам частиц дисперсий SiO_2 , полученных с помощью КУ-2-8 на основе систем «жидкое стекло – вода» с различной массовой долей SiO_2

Fig. 3. Particle size distribution curves of SiO_2 dispersions obtained using KU-2-8 based on liquid glass–water systems with different SiO_2 mass fraction

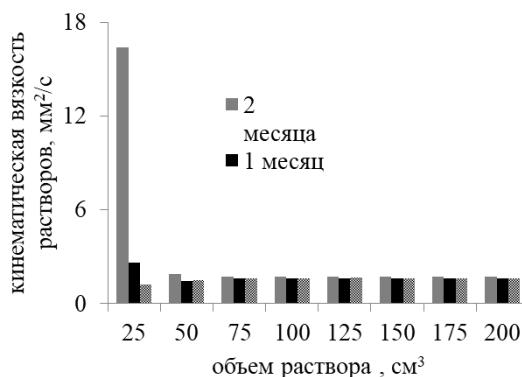


Рис. 4. Зависимость кинематической вязкости образцов, полученных в динамическом режиме с помощью ФИБАН К-1, от объема жидкого стекла (6 % масс. SiO_2), пропущенного через ионит

Fig. 4. The dependence of the kinematic viscosity of the samples obtained in the dynamic mode using FIBAN K-1 on the volume of liquid glass (6% wt. SiO_2) passed through the ion exchanger

Таблица 3. Размер частиц дисперсий диоксида кремния, полученных с помощью различных ионитов

Table 3. Particle size of silicon dioxide dispersions obtained using various ionites

Параметр	КУ-2-8		Сульфоуголь	ФИБАН	Модифицированная целлюлоза
	Исходный	Регенерированный			
Коэффициент полидисперсности	0.36	0.63	0.59	0.34	0.27
$D_x 10$, мкм	2.17	4.53	2.54	0.46	0.53
$D_x 50$, мкм	3.34	7.11	4.13	0.62	0.68
$D_x 90$, мкм	8.70	18.0	7.89	0.99	1.03

меньшей ширине пика на кривой распределения по размерам частиц и соответственно указывает на большую однородность образцов. Кроме того, дисперсии SiO_2 , полученные с помощью модифицированной целлюлозы и ФИБАН К-1, в целом можно отнести к наногетерогенным (размер частиц не превышает 1000 нм, составляя в среднем 620-680 нм), в то время как полученные с помощью КУ-2-8 и сульфоугля – к микрогетерогенным (размер частиц достигает 8.7 мкм, составляя в среднем 3.34-4.13 мкм). Использование регенерированного ионита приводит к образованию коллоидных частиц большего размера. Тем не менее, нам пред-

ставляется возможным при необходимости и в целях снижения экономических затрат использовать регенерированные иониты.

Методом сканирующей электронной микроскопии при последовательно возрастающем коэффициенте увеличения 1000 и 10000 исследована микроструктура поверхностей ксерогелей, образованных из золей, полученных с помощью КУ-2-8 и модифицированной целлюлозы. Результаты представлены на рисунке 7.

Установлено, что форма и размер частиц в исследуемых системах зависят от вида используемого ионита. Показано, что для ксерогелей, образованных из золей, полученных с помощью модифици

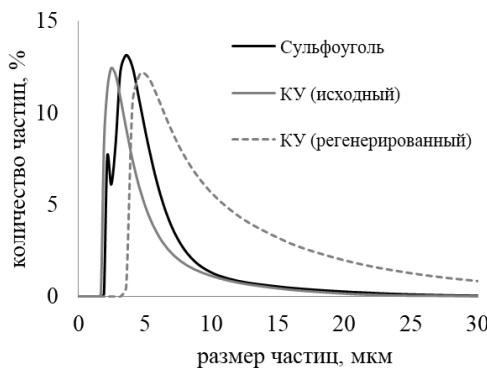


Рис. 5. Кривые распределения по размерам частиц образцов, полученных с помощью гранулированных ионитов

Fig. 5. Particle size distribution curves of samples obtained using granular ion exchanger

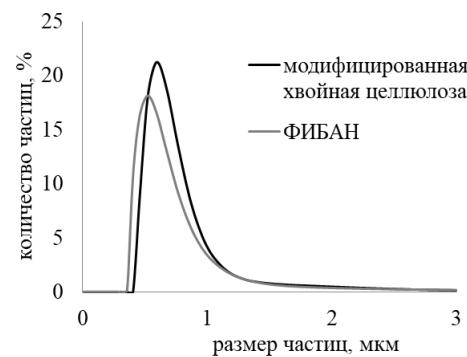
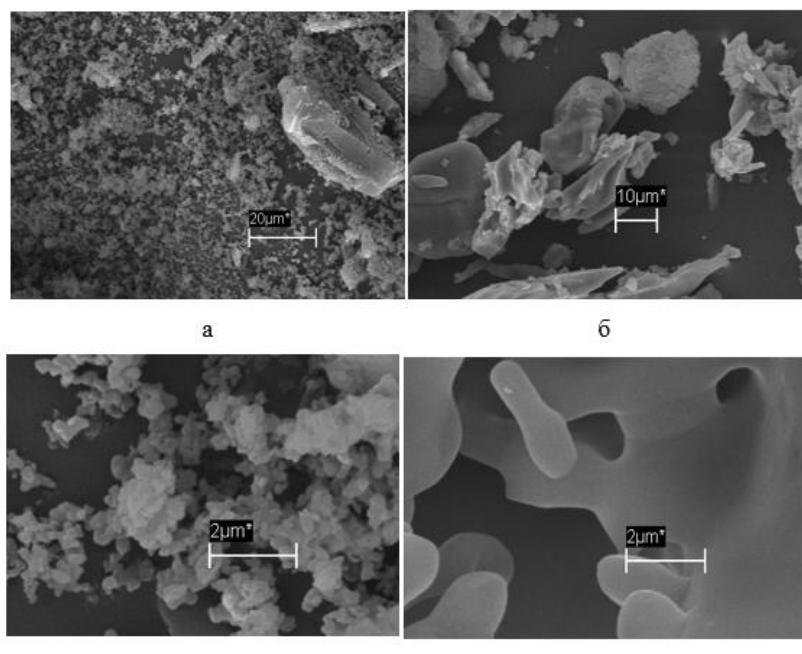


Рис. 6. Кривые распределения по размерам частиц образцов, полученных с помощью волокнистых ионитов

Fig. 6. Particle size distribution curves of samples obtained using fibrous ion exchanger



а, б – увеличение 1000х, в, г – увеличение 10000х

Рис. 7. СЭМ-изображения ксерогелей SiO_2 , образованных из золей, полученных с помощью фосфорилированной целлюлозы (а, в) и КУ-2-8 (б, г)
 Fig. 7. SEM images of SiO_2 xerogels formed from sols obtained with phosphorylated cellulose (a,c) and KU-2-8 (b,d)

рованной целлюлозы, характерна большая однородность и структурированность поверхности, чем в случае с КУ-2-8. Размер частиц не превышает 500-700 нм, что совпадает с данными метода лазерной дифракции, хотя встречаются и крупные агломераты частиц (свыше 20 мкм). В ксерогелях, образованных из зо-

лей, полученных с помощью КУ-2-8, основная доля представлена микрометровыми частицами (свыше 10 мкм). Вероятно, такие ксерогели содержат значительную долю водной компоненты, конденсированной в порах, о чем свидетельствует их ажурная микроструктура при увеличении 10000х.



Заключение

Таким образом, с помощью гранулированных и волокнистых ионитов, в том числе фосфорилированной сульфатной целлюлозы, получена серия образцов микро- и нанодисперсий диоксида кремния. Результаты ИК-спектроскопии свидетельствуют о наличии в полученных системах полос, в целом характерных для аморфного гидроксилированного кремнезема. Показано, что наиболее устойчивые дисперсии образуются при использовании систем «жидкое стекло-вода» с массовой долей SiO_2 , равной 6%, при этом размер частиц зависит от типа используемого ионита. Установлено, что волокнистые катиониты позволяют получать коллоидные системы с меньшим размером частиц и большей однородностью по сравнению с гранулированными. Показано, что модифицированная целлюлоза является перспективным материа-

лом для получения нанодисперсий диоксида кремния. Продемонстрирована возможность использования не только исходного, но и регенерированного катионита, что выгодно с экономической точки зрения.

Практическая значимость полученных результатов заключается в расширении номенклатуры полирующих композиций на основе SiO_2 с целью их применения в электронной промышленности для химико-механической полировки полупроводниковых пластин, что позволит в будущем отказаться от дорогостоящих импортных материалов и снизить затраты на производство конечной продукции.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет известных финансовых конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в этой статье.

1. Potapov V.V., Gorev D.G. *Industrialnaya ekonomika*, 2022; 1(1): 21-33. (In Russ.)
2. Nengyuan Zeng, Hongdong Zhao, Yuling Liu, Chenwei Wang, Chong Luo, Wantang Wang, Tenga Ma. *Silicon*, 2021; 14: 7473-7481.
3. Kosenok Ya.A., Gaishun V.E., Tylenkova O.I. *Problemy fiziki, matematiki i tekhniki*, 2018; 37(4): 25-29. (In Russ.)
4. Shabanova N.A., Sarkisov P.D. *Osnovy zol-gel tekhnologii nanodispersnogo kremnezemza*. M., Akademkniga, 2004, 208 p. (In Russ.)
5. Shilova O.A. *Sol-gel technology of micro- and nanocomposites*. St. Petersburg, Lan, 2022, 304 p. (In Russ.)
6. Faustova Z.V., Slizhov Y.G. *Inorg Mater*, 2017; 53: 287-291. <https://doi.org/10.1134/S0020168517030050>
7. Emrie D.B. *Journal of Nanomaterials*, 2024; 1. <https://doi.org/10.1155/2024/6109770>
8. Higuchi K., Liu Y., Unno M. *Solids*, 2025; 6(2): 20. <https://doi.org/10.3390/solids6020020>
9. Noppari P., Laukkanen O., Seppälä J. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2025; 710: 136290. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2025.136290>.
10. Khludneva A.S., Karpov S.I., Roessner F., Selemenev V.F. *Sorbtsionnye I Khromatograficheskie Protsessy*. 2021; 21(5): 669-680. <https://doi.org/10.17308/sorpcchrom.2021.21/3773> (In Russ.)
11. Maiorov D.V. *Sorbtsionnye I Khromatograficheskie Protsessy*, 2023; 23(3): 413-425. <https://doi.org/10.17308/sorpcchrom.2023.23/11321> (In Russ.)
12. Marchenko L.N., Kosenok Y.A., Gaishun V.E., Bruttan Y.V., *Kompiuternie issledovaniya i modelirovaniye*, 2024; 16(5): 1217-1253. (In Russ.)
13. Kudriavtsev P.G., *Inzhenerny Vestnik Doma*, 2018; 3. Mode of access: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2018/5099> (Date of access 04.05.2025). (In Russ.)



14. Akkaya B., Aslan J., Tasdemir R., Erdem İ., Gönen M., *Open Journal of Nano*, 2024; 9(1): 1-10. <https://doi.org/10.56171/ojn.1402531>
15. Polikarpov A.P., Shunkevich A.A., Grachev V.I., Mediak G.V. *Ros. Khim. Zh. (Zh. Ros. Khim. obshchestva im. D. I. Mendeleva)*, 2015; 59(3): 102-111. (In Russ.)
16. Kimlenka I.M., Mokhamad R.R., Novitskaya M.B., Melekhovets N.A., Kosenok Ya.A., Gaishun V.E. Ispolzovanie modifitsirovannoi celulose dla poluchenia kolloidnyx system na osnove dioksida kremniya, «Polimernie kompozity i tribologiya-2022 (Polikormtrib-22)», Proceedings of the International Conference, June 28-30, 2022, Gomel, 2024. p. 134. (In Russ.)
17. Luneva N.K., Ezovitova T.I., Shevchuk V.V., Smychnik A.D. *Vesti Natsionalnoi Akademii nauk Belarusi Besci. Seriya khimicheskix nauk*, 2018; 54(2): 204-215. (In Russ.)
18. Grinshpan D., Savitskaya T., Tsygankova N., Makarevich S., Kimlenka I., Ivashkevich O. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 2017; 5: 1-13.
19. Elatontsev D.A., Mukhachev A.P. *Izvestiya vuzov. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya*, 2020; 63(11): 88-95. (In Russ.)
20. Frolov Y.G. *Kurs kolloidnoi khimii: Poverkhnostnye yavleniya i dispersnye sistemy*. Moscow, Khimiya, 1989, 464 p. (In Russ.)
21. Murashkevich A.N., Lavitskaya A.S., Barannikova T.I., Zharsky I.M. *Journal of Applied Spectroscopy*, 2008; 75(5): 724-728. (In Russ.)
22. Aleeva S.V., Koksharov S.A., Kornilova N.L., Gorelova A.E., *Zhurnal Fizicheskoi Khimii*, 2020; 94(6): 938-942. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

И.М. Кимленко – заведующий кафедрой радиационной химии и химико-фармацевтических технологий, к.х.н., Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь, ORCID: 0000-0001-5035-2993

Т.А. Савицкая – профессор кафедры физической химии и электрохимии, д.х.н., Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь, ORCID: 0000-0003-4151-3614

Ю.А. Столбунова – магистрант химического факультета, Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

Я.А. Косенок – доцент кафедры оптики, к.т.н., Гомельский государственный университет, Гомель, Беларусь, ORCID: 0000-0002-7489-4241

В.Е. Гайшун – заведующий кафедрой оптики, к.ф-м.н., Гомельский государственный университет, Гомель, Беларусь, ORCID: 0000-0002-2564-4422

I.M. Kimlenka – PhD (Chemistry), Head of the Radiation Chemistry and Chemical-Pharmaceutical Technologies Department, Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus, e-mail: kimlenka@bsu.by

T.A. Savitskaya – Dr. Sc. (Chemistry), Professor of the Physical Chemistry and Electrochemistry, Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus, e-mail: savitskayata@bsu.by

Yu.A. Stalbunova – Master student, Faculty of Chemistry, Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus, e-mail: StolbunovaYA@bsu.by

Ya.A. Kosenok – PhD (Technical Sciences), Associate Professor of the Department of Optics, Gomel State University, Gomel, Republic of Belarus, e-mail: ykosenok@gsu.by

V.E. Gaishun – PhD (Physics and Mathematics), Head of the Department of Optics, Gomel State University, Gomel, Republic of Belarus, e-mail: ygaishun@gsu.by

Статья поступила в редакцию 07.05.2025; одобрена после рецензирования 01.10.2025; принята к публикации 15.10.2025.

The article was submitted 07.05.2025; approved after reviewing 01.10.2025; accepted for publication 15.10.2025.