

ISSN 1561-8331 (Print)

ISSN 2524-2342 (Online)

УДК 544.773.13; 544.722

<https://doi.org/10.29235/1561-8331-2024-60-2-136-144>

Поступила в редакцию 20.06.2023

Received 20.06.2023

А. С. Письменская, В. Д. Кошевар, И. П. Кажуро, В. Г. Шкадрецова

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

ФУНКЦИОНАЛИЗАЦИЯ ПОРОШКОВ АЭРОСИЛА, ДИОКСИДА ТИТАНА И КИЗЕЛЬГУРА МЕТОДОМ СМАЧИВАНИЯ АГЕНТОМ С НИЗКОЙ ПОВЕРХНОСТНОЙ ЭНЕРГИЕЙ И ИССЛЕДОВАНИЕ ИХ СВОЙСТВ

Аннотация. Исследованы условия функционализации микро-, нанопорошков аэросила, диоксида титана и кизельгура путем смачивания их жидким гидрофобизирующим агентом (тетраэтоксисилан) и придания им фобно/фильных свойств. С применением ИК-спектроскопии, дериватографии, сканирующей электронной микроскопии и ξ -метрии исследован механизм взаимодействия тетраэтоксисилана с поверхностью указанных порошков и их морфология. Для всех модифицированных таким образом порошков характерно негетерогенное распределение частиц с различными уровнями агрегации: преимущественно микрометрическая популяция частиц (кизельгур), образование микрометрического размера в сочетании с нанокластерами (аэросил, диоксид титана). Разбавленные суспензии функционализированных порошков во фторированном лаке были использованы для гидрофобизации поверхностей стекла, алюминия и стали. Наиболее высокое значение краевого угла смачивания водой (156°) наблюдалось для покрытий по алюминию, полученных с использованием композиции, содержащей функционализированный аэросил.

Ключевые слова: функционализация, гидрофобные свойства, аэросил, диоксид титана, кизельгур, тетраэтоксисилан, смачивание, морфология, краевой угол смачивания

Для цитирования. Функционализация порошков аэросила, диоксида титана и кизельгура методом смачивания агентом с низкой поверхностной энергией и исследование их свойств / А. С. Письменская [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. хим. наук. – 2024. – Т. 60, № 2. – С. 136–144. <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2024-60-2-136-144>

A. S. Pismenskaya, V. D. Koshevar, I. P. Kajuro, V. G. Shkadretsova

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

FUNCTIONALIZATION OF AEROSIL, TITANIUM DIOXIDE AND DIATOMACEOUS EARTH POWDERS BY WETTING WITH A LOW SURFACE ENERGY AGENT, AND STUDY OF THEIR PROPERTIES

Abstract. The conditions for functionalization of micro- and nanopowders of aerosil, titanium dioxide and diatomaceous earth by wetting them with a liquid hydrophobic agent (tetraethoxysilane) and giving them fobno/philic properties are investigated. Using infrared spectroscopy, derivatography, scanning electron microscopy, and ξ -metry, the mechanism of tetraethoxysilane interaction with the surface of these powders and their morphology were studied. All powders thus modified are characterized by a non-homogeneous distribution of particles with different aggregation levels: predominantly micrometer-sized particle population (diatomaceous earth), micrometer-sized formation combined with nanoclusters (aerosil, titanium dioxide). Diluted suspensions of functionalized powders in fluorinated varnish were used for hydrophobization of glass, aluminum, and steel surfaces. The highest value of the water wetting edge angle (156°) was observed for aluminum coatings obtained using a composition containing functionalized aerosil.

Keywords: functionalization, hydrophobic properties, aerosil, titanium dioxide, diatomaceous earth, tetraethoxysilane, wetting, morphology, edge wetting angle

For citation. Pismenskaya A. S., Koshevar V. D., Kajuro I. P., Shkadretsova V. G. Functionalization of aerosil, titanium dioxide and diatomaceous earth powders by wetting with a low surface energy agent, and study of their properties. *Vestsi Natsyynal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya khimichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical series*, 2024, vol. 60, no. 2, pp. 136–144 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2024-60-2-136-144>

Введение. Создание и использование объемных супергидрофобных покрытий представляют собой новый (третий) этап супергидрофобных технологий. Успешное развитие исследований в данном направлении не только сделает супергидрофобные покрытия гораздо более долговечными, но и расширит область их применения в совершенно новых сферах практики. В этом плане привлекают значительное внимание гибридные системы, например, на основе силиконов/

оксидов, фторсиланов/оксидов [1–4] благодаря хорошей способности их влиять на поверхностную энергию и смачиваемость материалов и покрытий. Так, диоксид кремния (SiO_2) ввиду особой химии поверхности является гидрофильным, а его нано- и микротекстурированная поверхность, вероятно, будет супергидрофильной и будет прекрасно смачиваться водой. Краевой угол смачивания будет равен 0° . Если частицы SiO_2 полностью функционализировать воздействием на них гидрофобных соединений с малой поверхностной энергией, то они могут стать супергидрофобными и не будут вообще смачиваться водой. Если же их функционализировать только частично, то каждая частица SiO_2 может одновременно иметь как супергидрофобную, так и супергидрофильную часть поверхности. При взаимодействии капель воды с этими частицами формируется своего рода водный мрамор – такое состояние, когда капли воды смачивают супергидрофильные поверхности частиц и не смачивают супергидрофобные части. Сам «водный мрамор», в котором частицы SiO_2 взаимодействуют между собой по гидрофильным участкам поверхности, не будет смачиваться другими каплями воды по супергидрофобной поверхности, образуя после испарения воды супергидрофобную пористость по всему объему.

Для того чтобы создать такую же фобную/фильную систему, но с эффектом «мраморной смолы» (рис. 1), в обычной лакокрасочной системе нужно воссоздать ту же самую двойственную природу притяжения и отталкивания супергидрофобного и одновременно супергидрофильного SiO_2 . Одним из путей достижения эффекта отталкивания и эффекта адгезии частиц является применение инертных растворителей, например флуоринерта 3М [5]. Если SiO_2 сначала смочить с использованием инертного растворителя с низкой поверхностной энергией, то растворитель может эффективно защитить его от полного обволакивания краской, при этом сохраняя поры и некоторые участки свободными. Когда инертный растворитель полностью испаряется и такие особые краски затвердевают, то получается объемная супергидрофобная краска, обладающая как микропористостью, так и нанопористостью по всему объему (рис. 2).

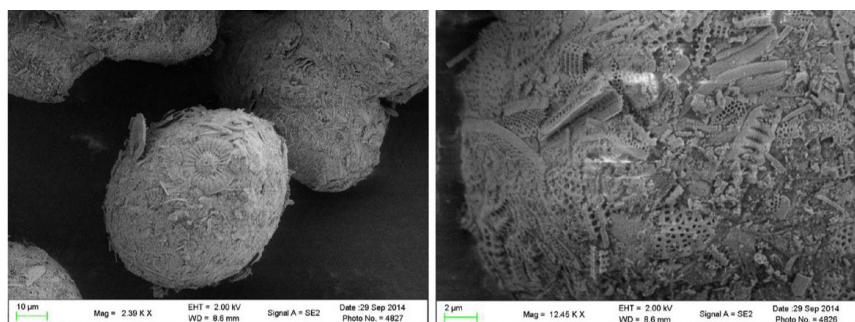


Рис. 1. «Мраморные смолы» и изображение их крупным планом [5]

Fig. 1. «Resin marbles» and their close-up image [5]

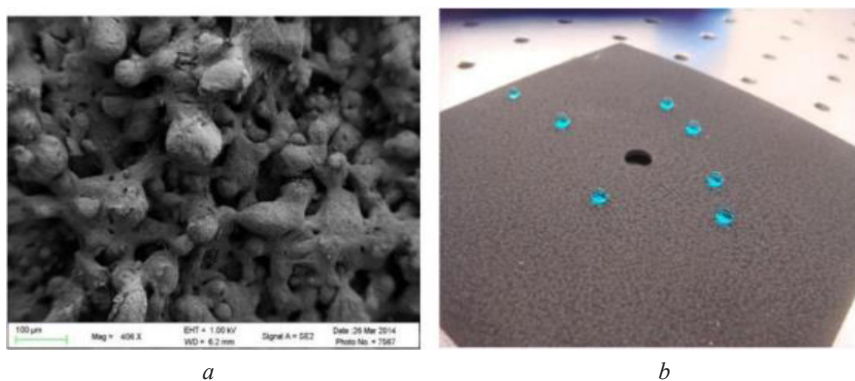


Рис. 2. Объемная микропористая структура порошкового покрытия (а) и вид капель воды на поверхности такого покрытия (b) [5]

Fig. 2. Volumetric microporous structure of the powder coating (a) and the view of water droplets on the surface of such a coating (b) [5]

Цель настоящего исследования – функционализация неорганических микро-, нанопорошков методом смачивания пропиткой с использованием агентов с низкой поверхностной энергией для придания им мозаичной фобно/фильной поверхности и изучение их свойств.

Материалы и методы исследования. Три вида микро- и наночастиц (аэросил 380 HL (Китай, содержание SiO_2 – 99,8 %, удельная поверхность – $380 \text{ м}^2/\text{г}$, средний размер частиц – 0,05 мкм, насыпная плотность 60 г/л); диоксид титана рутильной формы (TiO_2) (Precheza, Чехия, средний размер частиц – 0,2 мкм, удельная поверхность – $110 \text{ м}^2/\text{г}$); кизельгур (ООО «Диамкс», средний размер частиц – 2 мкм, удельная поверхность – $30 \text{ м}^2/\text{г}$, насыпная плотность – $300 \text{ кг}/\text{м}^3$)) были подвержены функционализации путем смачивания пропиткой гидрофобным агентом тетраэтоксисиланом с химической формулой $\text{C}_2\text{H}_5\text{O}_4$ (ТУ 6-09-3687-79, ООО «Силоксан», марка «ч. д. а.», плотность – $0,9350 \text{ г}/\text{см}^3$, температура кипения – 169°C , рис. 3).

В процессе смачивания используемые порошки были функционализированы молекулами тетраэтоксисилана следующим образом: 1 г порошков был продиспергирован в течение 2 ч при 700 об/мин и 20°C в 10–20 мл ТЭС с помощью магнитной мешалки C-MAG HS 10 (IKA-Werke GmbH). Затем порошки были отделены от жидкой среды методом фильтрования на синем фильтре и высушены до постоянного веса при температуре 80°C . Суспензии порошков методом полива наносили на различные поверхности. Для этого использовали пластины из покрывного стекла размером $26 \times 76 \times 1 \text{ мм}$, алюминия (деформирующийся сплав марки АД-1Н) и стали (марка Ст 08кп). Все металлические подложки проходили предварительную подготовку: обезжиривание ацетоном, грубая и тонкая шлифовка до зеркального блеска, травление. Для образцов алюминия химическое травление происходило в 1,2 М растворе NaOH при температуре 18°C в течение 5 мин. Поверхности из стали подвергали химическому травлению в 10%-м растворе HCl при температуре 18°C в течение 8 мин. Стекланные пластинки обрабатывали в 30%-м растворе лимонной кислоты в течение 30 мин. Окончательная стадия подготовки всех подложек включала их промывку дистиллированной водой и сушку при температуре 80°C в течение 60 мин. Для определения углов смачивания функционализированных порошков готовили их 2%-е дисперсии в 5%-м растворе фторированного лака ЛФ-32ЛН (ООО «Спец ЛКМ»). Для этого использовали функционализированные порошки аэросила, кизельгура и диоксида титана, имеющие максимальную потерю массы при температуре 400°C (показание дериватографических кривых). Приготовление раствора лака и суспензий порошков производили с помощью магнитной мешалки C-MAG HS 10 (IKA-Werke GmbH) при скорости вращения 500 об/мин в течение 15 мин (при получении раствора лака) и 4 ч (при получении суспензии). Суспензии наносили методом полива на подготовленные поверхности, сушили на воздухе при комнатной температуре в течение 24 ч и подвергали термической обработке в течении 30 мин при 250°C .

Изменения, происходившие в результате функционализации порошков, исследовали с применением инфракрасного спектрометра M 2000 Series фирмы MTDAC (США) с Фурье-преобразованием в области $400\text{--}4000 \text{ см}^{-1}$ и с разрешением 4 см^{-1} . Зарегистрированные спектры обрабатывали с помощью программы Grams/32 фирмы Galactic (США). Образцы для исследования готовили таблетированием с KBr. Дериватограммы образцов получали на дериватографе Q 1500D (фирма MOM, система Паулик–Паулик–Эрдей) в температурном интервале $293\text{--}173 \text{ К}$ в воздушной атмосфере. Масса навески составляла 200 мг, скорость подъема температуры – 5 град/мин. В качестве эталона использовали прокаленный оксид алюминия марки «х. ч.». Определение величины и знака электрокинетического потенциала частиц порошков (ξ -потенциала) проводили на приборе Zetaphoremeter IV (Франция). Диапазон измерения ξ -потенциала – $\pm 5\text{--}80 \text{ мВ}$, погрешность измерений – $\pm 5 \%$, длительность измерений – до 300 с, разрешающая способность в светлом поле – $3\text{--}50 \text{ мкм}$, объем пробы – $5\text{--}50 \text{ мл}$. Значение ξ -потенциала рассчитывали по формуле Гельмгольца–Смолуховского [6]. Для определения краевого угла смачивания использовали гониометр KRUSS DSA 25B (Германия) с диапазоном измерения от 1 до 180°

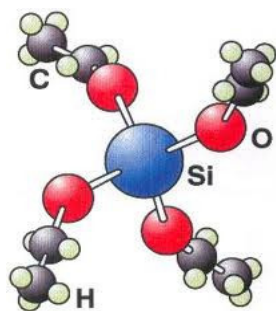


Рис. 3. Структурная формула тетраэтоксисилана

Fig. 3. Structural formula of tetraethoxysilane

и точностью $\pm 0,1^\circ$. Измерения проводили путем нанесения капель дистиллированной воды объемом 7–10 мкл на поверхность образца. На каждом образце проводилось не менее пяти измерений на разных участках его поверхности и рассчитывалось среднее арифметическое значение КУС. Размеры частиц и агрегатов определяли при помощи сканирующего электронного микроскопа.

Результаты и их обсуждение. Перед функционализацией аэросил, диоксид титана и кизельгур проявляли гидрофильные свойства из-за множества гидроксильных групп, существующих на их поверхности. Все функционализированные порошки демонстрировали гидрофобное поведение, разные в значительной степени смачивающие свойства в зависимости от вида порошка и его структурных особенностей (рис. 4).

СЭМ-изображения (см. рис. 4) всех порошков характеризуются неомогенным распределением частиц с разными уровнями их агрегации. Все порошки в основном имеют микрометрические размеры. Кизельгур – наиболее полидисперсный из них. Он состоит из отчетливой популяции частиц микропорядка (рис. 4, *a*). Для диоксида титана (рис. 4, *b*) и особенно для аэросила (рис. 4, *c*) заметно наличие нанокластеров. Размеры частиц и агрегатов, отображенных на СЭМ-микрофотографиях, хорошо коррелируют с распределением размеров частиц в суспензиях, полученных с помощью лазерного фотоседиментометра Nanosizer N4 и Zetaiser Nano S ZEN1600. Агломераты (микрометрических размеров) образуются в результате испарения растворителя. Образец аэросила показывает значительно более низкую тенденцию к формированию агломератов при испарении растворителя и меньший разброс частиц по размерам.

Появление поглощения в области $2\,978\text{--}2\,822\text{ см}^{-1}$ для всех спектров порошков, характерного для валентных колебаний С–Н-связей несимметричных и симметричных групп CH_2, CH_3 тетраэтоксисилана [7] (рис. 5, 6, *b, c*), а также снижение интенсивности поглощения в области колебаний ОН-групп порошков ($3\,625\text{--}2\,450\text{ см}^{-1}$), свидетельствуют о взаимодействии гидрофобного агента с их поверхностью. Возможное приобретение исследуемыми порошками гидрофобных свойств объясняется на основе данных ИК-спектроскопии также возникновением хемосорбционных связей между органическими фрагментами и ОН-группами порошков. Более высокая интенсивность пиков, принадлежащих С–Н-связям CH_2, CH_3 -групп, взаимодействующим посредством водородных связей с порошками, свидетельствует о достаточно высокой функционализации всех порошков.

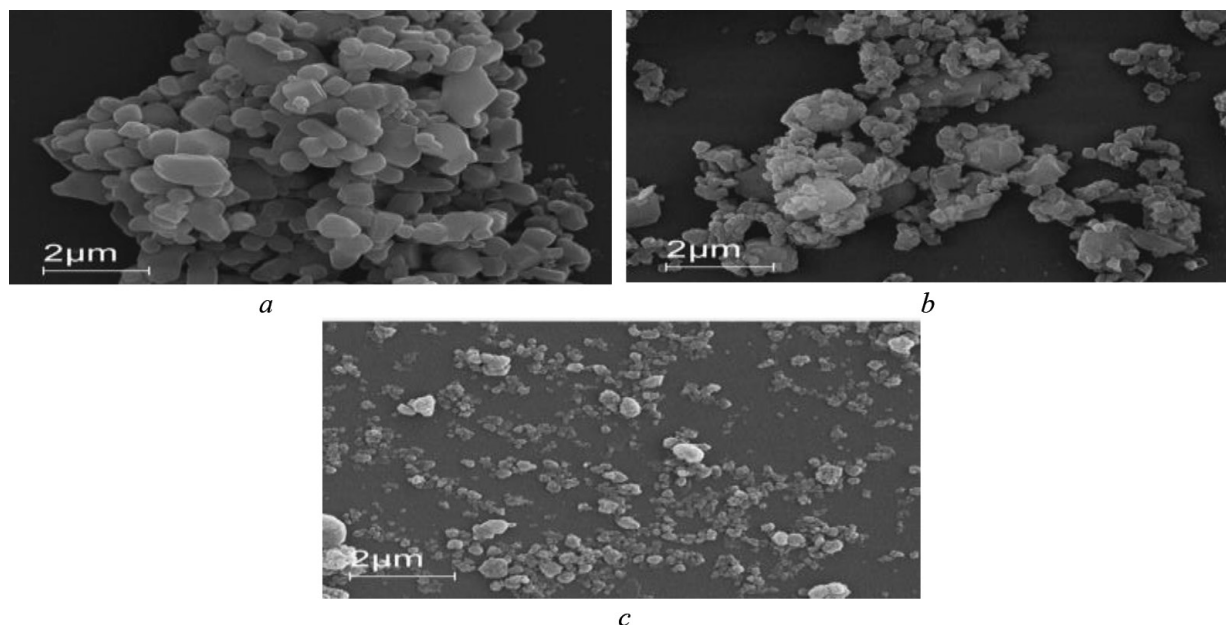


Рис. 4. Морфология поверхности порошков после функционализации: кизельгур (*a*), диоксид титана (*b*) и аэросил (*c*)

Fig. 4. Surface morphology of powders after functionalization: diatomaceous earth (*a*), titanium dioxide (*b*) and aerosil (*c*)

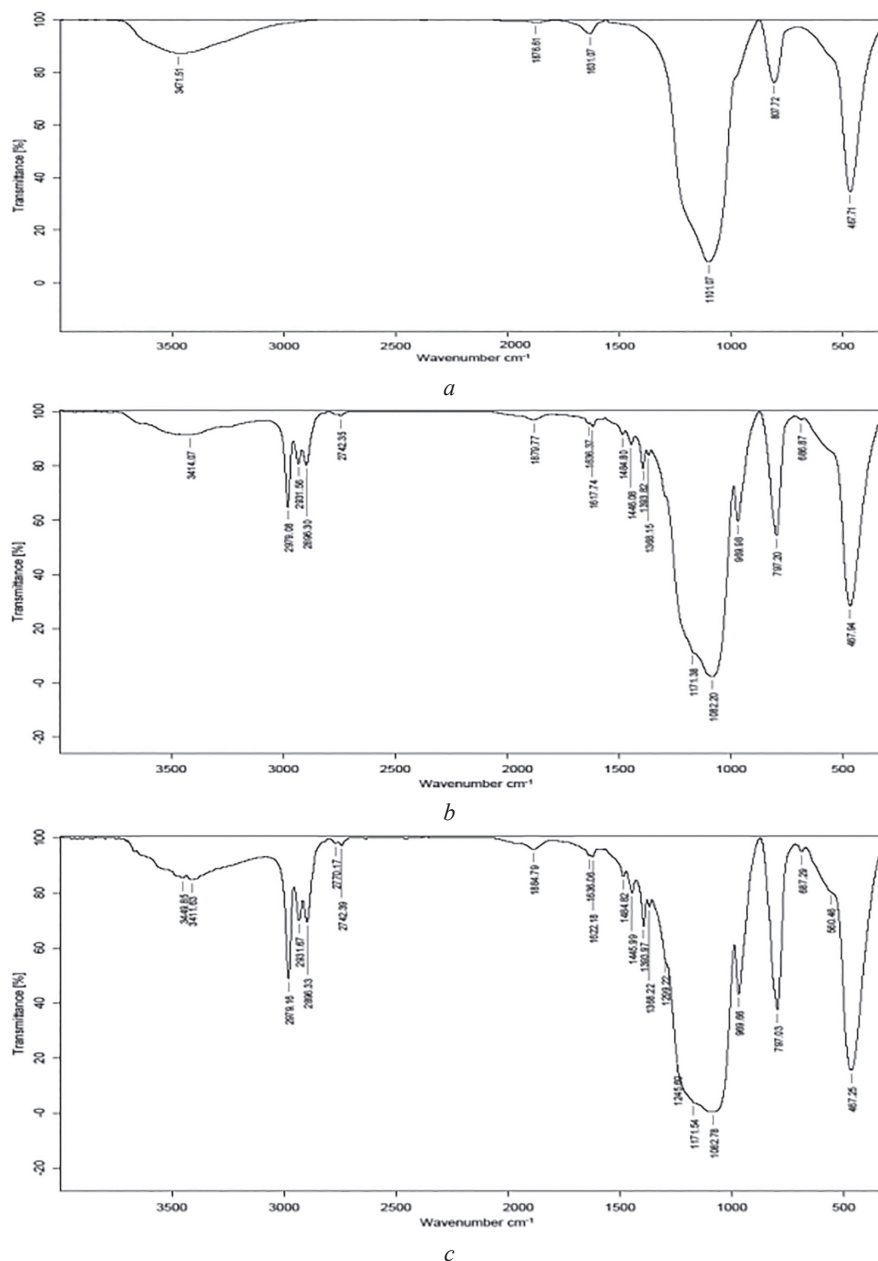


Рис. 5. ИК-спектры аэросила (а) и аэросила, функционализированного тетраэтоксисиланом в различных условиях: диспергирование 1 г аэросила в 15 мл тетраэтоксисилана (b), 1 г в 20 мл (c).
Время диспергирования 120 мин при 20 °С

Fig. 5. IR spectra of aerosil (a) and aerosil functionalized with tetraethoxysilane under different conditions: dispersion of 1 g of aerosil in 15 ml TES (b), 1 g in 20 ml (c).
Dispersion time was 120 min at 20 °C

Данные ИК-спектроскопических исследований подтверждаются полученными термограммами на примере функционализированных аэросила и кизельгура (рис. 7). Для них характерно наличие экзотермического эффекта с максимумом при 270 °С, связанного с десорбцией физически адсорбированного и хемосорбированного тетраэтоксисилана и окислением его органической части. При этом потеря массы составляет 26–28 %, что свидетельствует о значительном количестве тетраэтоксисилана, адсорбированного и хемосорбированного поверхностью этих порошков. Термограммы подтверждают также установленный ИК-спектроскопией факт повышения степени гидрофобизации аэросила и кизельгура со снижением концентрации порошков в суспензиях на основе тетраэтоксисилана и соответственно повышения содержания тетраэтоксисилана.

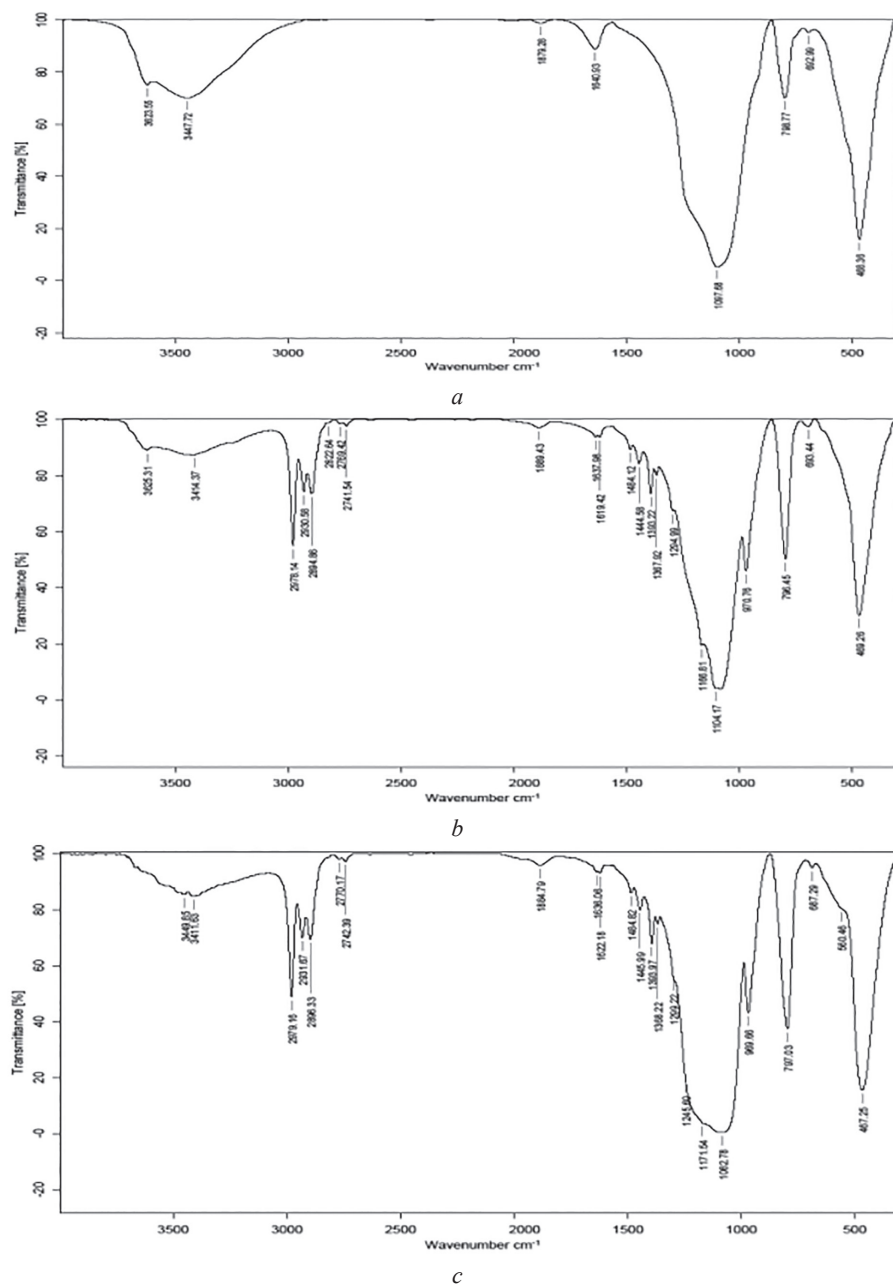


Рис. 6. ИК-спектры диоксида титана (а) и диоксида титана, функционализированного тетраэтоксисиланом в различных условиях: диспергирование 1 г аэросила в 15 мл ТЭС (b), 1 г в 20 мл (c).

Время диспергирования 120 мин при 20 °С

Fig. 6. IR spectra of titanium dioxide (a) and titanium dioxide functionalized with tetraethoxysilane in different conditions: dispersion of 1 g of aerosil in 15 ml TES (b), 1 g in 20 ml (c).

Dispersion time was 120 min at 20 °C

Установлено также, что функционализация порошков тетраэтоксисиланом приводит к снижению по абсолютной величине их ξ -потенциала (табл. 1), а это, в свою очередь, свидетельствует о снижении их гидрофильных свойств. Краевые углы смачивания функционализированных тетраэтоксисиланом порошков пропиткой, нанесенных на различные субстраты с использованием данных [8], приведены в табл. 2, а на рис. 8 демонстрируется вид капель воды на поверхности алюминия (a), покрытого пленкой из раствора фторированного лака (b) и алюминия с пленкой, образующейся после нанесения на него суспензии функционализированного аэросила во фторированном лаке (c).

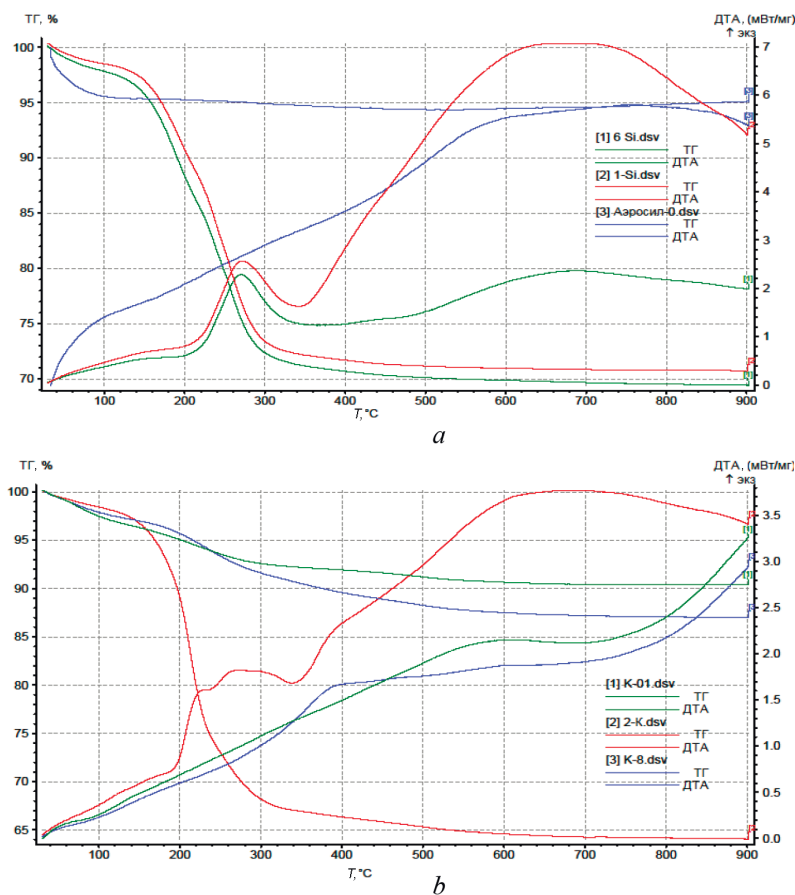


Рис. 7. Дериватограммы аэросила (а) и кизельгура (b), функционализированных тетраэтоксисилом в различных условиях: (а) 3 – исходный аэросил, 2 – аэросил (1 г диспергирован в 15 мл тетраэтоксисилана), 3 – аэросил (1 г диспергирован в 20 мл тетраэтоксисилана); (b) 1 – исходный кизельгур, 2 – кизельгур (1 г диспергировали в 15 мл тетраэтоксисилана), 3 – кизельгур (1 г диспергировали в 10 мл тетраэтоксисилана)

Fig. 7. Derivatograms of aerosil (a) and diatomaceous earth (b) functionalized with tetraethoxysilane in different conditions: a) 3 – initial aerosil, 2 – aerosil (1 g dispersed in 15 ml tetraethoxysilane), 3 – aerosil (1 g dispersed in 20 ml tetraethoxysilane); b) 1 – initial diatomaceous earth, 2 – diatomaceous earth (1 g dispersed in 15 ml tetraethoxysilane), 3 – diatomaceous earth (1 g dispersed in 10 ml tetraethoxysilane)

Таблица 1. Изменение ξ -потенциала порошков при их фукционализации методом пропитки тетраэтоксисилом

Table 1. Variation of ξ -potential of powders during their fuctionalization by tetraethoxysilane impregnation

№ п/п	Порошки	ξ -потенциал, мВ
1	Аэросил исходный	–22,93
2	Аэросил-тетраэтоксисилан	–16,74
3	Кизельгур исходный	–19,32
4	Кизельгур-тетраэтоксисилан	–17,66
5	Диоксид титана исходный	–55,49
6	Диоксид титана – тетраэтоксисилан	–36,00

Таблица 2. Краевые углы смачивания фукционализированных порошков, нанесенных на различные субстраты с использованием в качестве пленкообразователя фторированного лака

Table 2. Wetting edge angles of fuctionalized powders applied to various substrates using fluorinated varnish as a film forming agent

№ образца	Описание составов	Вид подложки	Краевой угол смачивания
1	Аэросил исходный	Стекло	63,8
		Алюминий	118,7
		Сталь	111,8

Окончание табл. 2

№ образца	Описание составов	Вид подложки	Краевой угол смачивания
2	Кизельгур исходный	Стекло	89,5
		Алюминий	106,1
		Сталь	95,2
3	Диоксид титана	Стекло	83,8
		Алюминий	99,9
		Сталь	98,3
4	Аэросил, обработанный жидким тетраэтоксисиланом в массовом соотношении 1 : 20 в течение 2 ч	Стекло	109,3
		Алюминий	156,1
		Сталь	147,7
5	Кизельгур, обработанный жидким тетраэтоксисиланом в соотношении 1 : 15 в течение 2 ч	Стекло	92,8
		Алюминий	110,1
		Сталь	97,1
6	Диоксид титана, обработанный жидким тетраэтоксисиланом в соотношении 1 : 10 в течение 2 ч	Стекло	88,8
		Алюминий	137,7
		Сталь	110,9

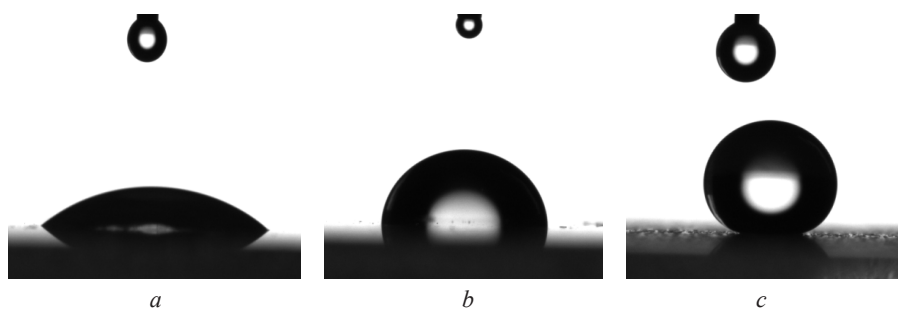


Рис. 8. Вид капель воды на поверхности стекла: *a* – необработанного стекла (33°); *b* – с покрытием из фторопластового лака (98°); *c* – из фторопластового лака с 2 % аэросила (156°)

Fig. 8. View of water drops on the glass surfaces: *a* – untreated glass (33°); *b* – coated with fluoroplastic varnish (98°); *c* – fluoroplastic varnish with 2 % aerosil (156°)

Из табл. 2 следует, что наивысшей гидрофобизации удастся достигнуть для аэросила. Краевые углы смачивания пленок, содержащих порошки, при этом зависят также от вида подложки, на которую они были нанесены, что объясняется, по-видимому, неодинаковой адгезией покрытий к различным по природе подложкам. Наиболее высокое значение краевого угла смачивания наблюдали для покрытий на алюминии.

Заключение. Разработана методика функционализации порошков аэросила, кизельгура и диоксида титана с целью придания им лиофобно/лиофильно мозаичности путем смачивания и пропитки гидрофобным агентом тетраэтоксисиланом.

Методами ИК-спектроскопии, дериватографии, сканирующей электронной микроскопии и дзето-метрии исследован механизм взаимодействия тетраэтоксисилана с поверхностью указанных порошков и их морфология. Все покрытия из фукционализированных таким методом порошков демонстрировали гидрофобное поведение, хотя в значительной степени различающееся по смачиванию водой, что обусловлено их разными химическим составом и морфологией.

Наивысшая степень гидрофобизации поверхностей стекла, алюминия и стали достигнута с применением фукционализированного аэросила. Краевые углы смачивания при этом зависят от вида подложки, на которую были нанесены пленки порошков, что объясняется, по нашему мнению, различной адгезией этих пленок к подложкам. Наиболее высокое значение краевых углов смачивания (156°) наблюдалось для покрытий по алюминию.

Модифицированные порошки будут использованы для создания покрытий с объемными супергидрофобными свойствами.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке БРФФИ (проект № X22-018. № государственной регистрации 20221090).

Acknowledgements. The work was carried out with the financial support of the Belarusian Republican Foundation for Basic Research (project № X22-018, grant № 20221090).

Список использованных источников

1. Superliquid-repellent surfaces prepared by colloidal silica nanoparticles covered with fluoroalkyl groups / M. Hikita [et al.] // *Langmuir*. – 2005. – Vol. 21, № 16. – P. 7299. <https://doi.org/10.1021/la05090r>
2. Engineered organic/inorganic hybrids for superhydrophobic coatings by wet and vapour procedures / G. Soliveri [et al.] // *J. Mater. Sci.* – 2014. – Vol. 49. – P. 2734–2744.
3. Transparent superhydrophobic films based on silica nanoparticles / J. Bravo [et al.] // *Langmuir*. – 2007. – Vol. 23, № 13. – P. 7293–7298.
4. Qingl, Yong-Quan. Facile approach in fabricating hybrid superhydrophobic fluorinated polymethylhydrosiloxane/TiO₂ nanocomposite coatings / Yong-Quan Qingl, Chuan-Ning Yangl, Yan Shang // *Colloid. Polym. Sci.* – 2015. – Vol. 293. – P. 1809–1816, <https://doi.org/10.1007/s00396-015-3570-3>
5. Superhydrophobic powder coatings: pat. US 20140094540 / J. T. Simpson. – Publ. date 03.04.2014.
6. Фридрихсберг, Д. А. Курс коллоидной химии / Д. А. Фридрихсберг. – Л.: Химия, 1984. – 508 с.
7. Беков, У. С. Спектральный анализ кремнийорганических соединений на основе фенола / У. С. Беков, Ф. Ф. Рахимов // *Universum: химия и биология*. – 2021. – Т. 83, № 5. – С. 27–30.
8. Смачивание изотропных микротекстур, сформированных на поверхности стекла и алюминия / В. Д. Кошевар [и др.] // *Вест. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. хім. навук*. – 2019. – Т. 55, № 3. – С. 309–317. <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2019-55-3-309-317>

References

1. Hikita M., Tanaka K., Nakamura T., Kajiyama T., Takahara A. Superliquid-repellent surfaces prepared by colloidal silica nanoparticles covered with fluoroalkyl groups. *Langmuir*, 2005, vol. 21, no. 16, p. 7299. <https://doi.org/10.1021/la05090r>
2. Soliveri G., Meroni D., Cappelletti G., Annunziata R., Aina V., Cerrato G., Ardizzone I. Engineered organic/inorganic hybrids for superhydrophobic coatings by wet and vapor procedures. *Journal of Materials Science*, 2014, vol. 49, pp. 2734–2744.
3. Bravo J., Zhai L., Wu Z., Cohen R., Rubner M. Transparent superhydrophobic films based on silica nanoparticles. *Langmuir*, 2007, vol. 23, no. 13, pp. 7293–7298.
4. Yong-Quan Qingl & Chuan-Ning Yangl & Yan Shang. Facile approach in fabricating hybrid superhydrophobic fluorinated polymethylhydrosiloxane/TiO₂ nanocomposite coatings. *Colloid and Polymer Science*, 2015, vol. 293, pp. 1809–1816. <https://doi.org/10.1007/s00396-015-3570-3>
5. Simpson J. T. Superhydrophobic powder coatings. US Patent 20140094540 (filed Septemder 28. 2012, pub Apr 3, 2014 ORNL).
6. Friedrichsberg D. A. *A course in colloidal chemistry*. Leningrad: Chemistry Publ., 1984. 508 p. (in Russian).
7. Bekov U. S., Rakhimov F. F. Spectral analysis of organosilicon compounds based on phenol. *Universum: khimiya i biologiya = Universum: chemistry and biology*, 2021, vol. 83, no. 5, pp. 27–30 (in Russian).
8. Koshevar V. D., Kajuro I. P., Shkadretsova V. G., Pismenskaya A. S. Wetting of isotropic microtextures formed on the surface of glass and aluminum. *Vestsi Natsyianal'nai akademii navuk Belarusi. Seryia khimichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical series*, 2019, vol. 55, no. 3, pp. 309–317 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2019-55-3-309-317>

Информация об авторах

Кошевар Василий Дмитриевич – доктор химических наук, профессор, заведующий лабораторией. Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси (220072, Минск, ул. Сурганова, 9/1, Республика Беларусь). E-mail: koshevar@igic.bas-net.by

Шкадретцова Валентина Георгиевна – старший научный сотрудник. Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси (220072, Минск, ул. Сурганова, 9/1, Республика Беларусь). E-mail: shgv@igic.bas-net.by

Письменская Александра Сергеевна – научный сотрудник. Институте общей и неорганической химии НАН Беларуси (220072, Минск, ул. Сурганова, 9/1, Республика Беларусь). E-mail: as.pismenskaya@mail.ru

Кажура Ирина Павловна – кандидат химических наук, старший научный сотрудник. Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси (220072, Минск, ул. Сурганова, 9/1, Республика Беларусь). E-mail: kair_770@mail.ru

Information about the authors

Koshevar Vasily D. – D. Sc. (Chemistry), Professor, Head of the Laboratory. Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: koshevar@igic.bas-net.by

Shkadretsova Valentina G. – Senior Researcher. Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail shgv@igic.bas-net.by

Pismenskaya Alexandra S. – Research. Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail as.pismenskaya@mail.ru

Kajura Irina P. – Ph. D. (Chemistry), Senior Researcher. Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: kair_770@mail.ru