



Антикоррозионные праймерные покрытия на основе акрилатных триалкоксисиланов

М.Ж. Журинов***, А.М. Налибаева*✉, Е.Н. Оборина***, И.Б. Розенцвейг*****,
С.Н. Адамович***, А.Н. Нефедов*, Д.С. Пузикова*, К.А. Леонтьева*,
Г.М. Хусурова*, Е.Н. Абдикалыков*

*Институт топлива, катализа и электрохимии им. Д.В. Сокольского,
Алматы, Республика Казахстан

**Научно-исследовательский институт нефтепереработки и нефтехимии,
Алматы, Республика Казахстан,

***Иркутский институт химии им. А.Е. Фаворского СО РАН, Иркутск, Российская федерация

****Иркутский государственный университет, Иркутск, Российская Федерация

Аннотация. Целью работы являлось установление закономерностей формирования и защитного действия кремнийорганических покрытий на основе акрилатных триалкоксисиланов в зависимости от условий гидролиза и состава рабочих растворов. В качестве объектов исследования использованы функциональные триалкоксисиланы с различной природой акрилатного заместителя и стальные подложки, на поверхность которых наносились покрытия. Для формирования покрытий использовали растворы органосиланов, полученных в условиях кислотного гидролиза. Процесс гидролиза контролировали методом тонкослойной хроматографии с использованием пластин с закрепленным слоем диоксида кремния. Морфологию и элементный состав сформированных покрытий исследовали методами сканирующей электронной микроскопии и энергодисперсионного анализа. Защитные свойства покрытий исследовали методом капельной пробы по Акимову. Изучено влияние кислотности среды, концентрации рабочих растворов и введения этанола на протекание гидролиза и формирование силоксанового слоя через связи металл – кислород – кремний. Наиболее эффективное протекание гидролиза наблюдается при pH 3, что обеспечивает получение стабильных растворов и однородность и равномерность покрытий. Показано, что оптимальная концентрация органосиланов в растворе составляет 4–7% – при ней формируется наиболее однородное покрытие. Выявлена взаимосвязь между условиями гидролиза, морфологией покрытий и их антикоррозионной стойкостью. Установлено, что нанесение покрытий способствует увеличению времени протекания коррозионной реакции по сравнению с необработанной поверхностью. Наиболее высокие защитные способности наблюдаются при концентрации органосиланов в растворах 4–7% и pH 3. Полученные результаты подтверждают перспективность применения исследованных органосиланов для создания эффективных праймерных покрытий.

Ключевые слова: кремнийорганические покрытия, антикоррозионная защита, органосиланы, триалкоксиланы, гидролиз органосиланов, морфология поверхности

Благодарности. Синтез функциональных силанов и спектральные исследования проведены с использованием оборудования Байкальского аналитического центра коллективного пользования Иркутского института химии им. А.Е. Фаворского СО РАН (г. Иркутск, Россия).

Финансирование. Исследование финансировалось Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (Программа BR24992812 «Разработка материалов и технологий, направленных на комплексную противокоррозионную защиту технологического оборудования в нефтехимической, машинно- и приборостроительной отраслях промышленности»).

Для цитирования: Журинов М.Ж., Налибаева А.М., Оборина Е.Н., Розенцвейг И.Б., Адамович С.Н., Нефедов А.Н. [и др.]. Антикоррозионные праймерные покрытия на основе акрилатных триалкоксисиланов // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2026. Т. 16. N 2. С. 162–173. DOI: 10.21285/achb.1035. EDN: XDVQMN.

Anti-corrosion primer coatings based on acrylate trialkoxysilanes

Murat Zh. Zhurynov^{***}, Arailym M. Nalibayeva^{*✉}, Elizaveta N. Oborina^{***},
Igor B. Rozentsveig^{*****}, Sergei N. Adamovich^{***}, Alexandr N. Nefedov^{*},
Darya S. Puzikova^{*}, Xeniya A. Leontyeva^{*}, Gulinur M. Khussurova^{*},
Yerlan N. Abdikalykov^{*}

^{*D.V. Sokolsky Institute of Fuel, Catalysis and Electrochemistry, Almaty, Kazakhstan}

^{**Scientific Research Institute of Petroleum Refining and Petrochemistry, Almaty, Kazakhstan}

^{***A.E. Favorsky Irkutsk Institute of Chemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russian Federation}

^{****Irkutsk State University, Irkutsk, Russian Federation}

Abstract. The article investigates the influence of hydrolysis conditions and working solution composition on the formation and protective performance of acrylate trialkoxysilane-based organosilicon coatings. The study employed functional trialkoxysilanes with various acrylate substituents and steel substrates used for coating deposition. The coatings were prepared using organosilane solutions obtained through acid hydrolysis. The process of hydrolysis was monitored via thin-layer chromatography using silica gel plates. The morphology and elemental composition of the resulting coatings were characterized using scanning electron microscopy and energy-dispersive X-ray spectroscopy. The protective performance was evaluated using Akimov's drop test. The research focused on the effects of medium acidity, working solution concentration, and ethanol addition on the hydrolysis and formation of a siloxane layer via metal–oxygen–silicon bonds. The highest hydrolysis efficiency was observed at pH 3, resulting in stable solutions and uniform coatings. The optimal organosilane concentration was found to range from 4% to 7%, which yields the highest degree of uniformity. A correlation was established between hydrolysis conditions, coating morphology, and corrosion resistance. Coating deposition was found to extend the corrosion induction period compared to untreated surfaces. The superior protective performance is achieved at organosilane concentrations of 4–7% and pH 3. The findings highlight the potential of the investigated organosilanes for developing effective primer coatings.

Keywords: organosilicon coatings, corrosion protection, organosilanes, trialkoxysilanes, organosilane hydrolysis, surface morphology

Acknowledgements. The synthesis of functional silanes and spectral studies were carried out using the equipment of the Baikal Analytical Center for Collective Use of the A.E. Favorsky Irkutsk Institute of Chemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Irkutsk, Russia).

Funding. The Committee of Science of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (grant no. BR24992812 "Development of materials and technologies aimed at comprehensive anticorrosion protection of process equipment in the petrochemical, machine and instrument-making industries") funded this research.

For citation: Zhurynov M.Zh., Nalibayeva A.M., Oborina E.N., Rozentsveig I.B., Adamovich S.N., Nefedov A.N., et al. Anti-corrosion primer coatings based on acrylate trialkoxysilanes. *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2026;16(2):162-173. (In Russian). DOI: 10.21285/achb.1035. EDN: XDVMN.

ВВЕДЕНИЕ

Повышение долговечности металлических конструкций является одной из ключевых задач современной промышленности. В нефтегазовой отрасли оборудование и трубопроводы эксплуатируются в условиях агрессивных сред, повышенных температур и давления, что ускоряет развитие коррозии [1–3]. В машиностроении и приборостроении коррозионные процессы приводят к снижению точности, нарушению функциональности узлов и сокращению срока службы изделий [4]. Экономические потери, обусловленные коррозией, включают расходы на ремонт, простой оборудования и преждевременную

замену металлических конструкций [5]. В этой связи разработка эффективных антикоррозионных и адгезионных покрытий, обеспечивающих длительную защиту металлов, представляет собой актуальную научно-техническую задачу.

Ключевую роль в обеспечении эксплуатационной надежности покрытий играет межфазный слой, формирующийся на границе раздела металл – покрытие. Его структура, химический состав и когезионная прочность могут существенно отличаться от характеристик объемных фаз, определяя механизмы сцепления и устойчивость системы к воздействию влаги, электролитов и агрессивных газов [6, 7]. Традиционные методы под-

готовки поверхности, такие как фосфатирование, хромирование, оксидирование, обеспечивают высокую адгезию и коррозионную защиту, однако отличаются многостадийностью, энергоемкостью и сопровождаются образованием токсичных сточных вод, содержащих ионы тяжелых металлов¹. Ужесточение экологических требований стимулирует поиск альтернативных, более безопасных технологий модификации металлической поверхности. В последние десятилетия все больше внимания уделяется кремнийорганическим покрытиям, сочетающим высокую химическую стойкость, термостабильность и способность формировать прочные адгезионные связи с металлической подложкой [8]. Силоксановая структура таких материалов характеризуется наличием прочной связи Si–O–Si, обеспечивающей устойчивость к воздействию влаги, ультрафиолетового излучения и агрессивных химических реагентов. Благодаря возможности направленной модификации органических заместителей в структуре кремнийорганических соединений удается регулировать гидрофобность, механическую прочность, эластичность и барьерные свойства покрытий, что расширяет области их применения в промышленности [9–13]. Особое значение приобретают праймерные покрытия на основе органосиланов, применяемые в качестве промежуточных адгезионных слоев в многослойных защитных системах. Такие покрытия обеспечивают химическое связывание металлической подложки с последующими полимерными или лакокрасочными слоями, повышая адгезионную прочность и долговечность всей системы. Использование силановых праймеров позволяет одновременно выполнять функции модификации поверхности и первичной антикоррозионной защиты, что делает их перспективной альтернативой традиционным методам предварительной обработки металлов [14].

Одним из наиболее перспективных направлений является применение органосилоксанов – кремнийорганических соединений общей формулы R–Si–X₃, где X представляет собой гидролизуемую группу (алкокси-, ацетокси-), а R – органический радикал, содержащий функциональные фрагменты [13, 15]. Бифункциональная природа силанов обеспечивает их способность одновременно взаимодействовать с гидроксильной поверхностью металла и с компонентами полимерной матрицы покрытия. В растворе силаны гидролизуются с образованием силанолов (Si–OH), которые при сушке конденсируются с формированием пространственно-сшитой силоксановой сетки². Образование ковалентных связей типа Si–O–Me в межфазной области способствует повышению адгезионной прочности, тогда как плотная структура слоя снижает проницаемость покрытия для воды и ионов, тем самым подавляя коррозионное разрушение металлической подложки [16, 17]. Следовательно, кремнийорганические модификаторы представляют собой

перспективный класс материалов, применяемых как в качестве самостоятельных антикоррозионных покрытий, так и в роли адгезионных праймеров в многослойных защитных системах, способствующих повышению долговечности металлических изделий при длительной промышленной эксплуатации. В настоящей работе представлены результаты исследований по получению кремнийорганических покрытий с антикоррозионными свойствами на поверхности стали. Исследованы условия формирования силоксанового слоя и их влияние на структуру и защитные характеристики покрытий.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

3-Аминопропилтриэтоксисилан (≥98%, Sigma-Aldrich, США), метилакрилат (99%, Sigma-Aldrich, США), этилакрилат (99%, Sigma-Aldrich, США), метанол (≥99,8%, Sigma-Aldrich, США), этанол (≥99,9%, Sigma-Aldrich, США), диэтиловый эфир (х.ч.), лимонную и уксусную кислоты (ч.д.а.) применяли без дополнительной очистки.

В качестве металлической подложки использовали сталь марки Ст20 толщиной 1 и 2 мм. Образцы изготавливали в виде купонов заданных размеров.

Синтез функциональных триалкоксисиланов. Смесь 3-аминопропилтриэтоксисилана (**1**) (1 ммоль) с метил- (**2a**) или этилакрилатом (**2b**) (1 ммоль) в 10 мл метанола (абс.) перемешивали при 50 °С в течение 2 ч в инертной атмосфере (N₂). Целевые силаны (**3a**) и (**3b**) выделяли в чистом виде путем отгонки растворителя. Выходы составили ~100%. Спектральные характеристики синтезированных триалкоксисиланов идентичны литературным данным [18].

Приготовление рабочих растворов. Расчетное количество триалкоксисиланов растворяли в дистиллированной воде до концентрации 1–15%. Растворы подкисляли лимонной или уксусной кислотой до pH 3–6. Гидролиз проводили при 24 °С в течение 24–48 ч. Концентрацию рабочих растворов варьировали для определения оптимальных условий формирования покрытия.

Процесс гидролиза контролировали методом тонкослойной хроматографии с применением пластин с закрепленным слоем SiO₂. Небольшое количество раствора наносили микропипеткой на стартовую линию пластин, далее пластину погружали в подвижную фазу (вода). Проявление индивидуальных пятен соединений на пластинах проводили в кабинете ультрафиолетового света CAMAG UV Cabinet 4. Пятна идентифицировали по сравнению со стандартными спиртами, образующимися по реакции кислотного гидролиза триалкоксисиланов³ [19].

Подготовка поверхности стали. Перед нанесением покрытий поверхность стальных образцов последовательно шлифовали абразивной бумагой (P240–600), очищали в ультразвуковой ванне от механических загрязнений, обезжиривали Уайт-спиритом и высушивали на воздухе.

¹ Preliminary study of the metal finishing category: 2015 status report. EPA-821-R-16-004 // 19january2021snapshot.epa.gov. Режим доступа: https://19january2021snapshot.epa.gov/sites/static/files/2016-07/documents/metal-finishing-study-2015-status-report_jun-2016.pdf (дата обращения: 08.05.2026).

² Silane coupling agents: connecting across boundaries // Gelest.com. Режим доступа: https://www.gelest.com/wp-content/uploads/Silane_Coupling_Agents.pdf (дата обращения: 08.05.2026).

³ Лабораторное руководство по хроматографическим и смежным методам / пер. с англ.; ред. О. Микеш. М.: Мир, 1982. В 2 ч. Ч. 1. 396 с.

Нанесение кремнийорганических покрытий. Образцы погружали в рабочие растворы при 24 °С на 5 мин при постоянном помешивании. После извлечения образцы сушили при 120–140 °С в течение 20–30 мин.

Морфология и элементный анализ. Микроструктуру поверхности и локальный элементный состав анализировали методом сканирующей электронной микроскопии на приборе JSM-6610LV. Толщину покрытий определили расчетным методом с использованием программы ThinFilmID.

Оценка защитной способности. Защитную способность покрытий определили методом капельной пробы по Акимову. На поверхность наносили каплю раствора, содержащего CuSO₄·5H₂O (82 г/л); NaCl (33 г/л); 0,1н HCl (13 мл/л). Фиксировали время изменения окраски капли от голубой до красновато-коричневой. Испытания проводили в 5–10 точках с последующим расчетом среднего значения защитной способности.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Синтез функциональных триалкоксисиланов. Функциональные триалкоксисиланы **3a,b** синтезированы взаимодействием 3-аминопропилтриэтоксисилана **1c** производными акриловой кислоты **2a,b** (рис. 1).

Реакция протекает по механизму нуклеофильного присоединения аминогруппы к активированной двойной связи α,β-ненасыщенного карбонильного соединения (аза-реакция Михаэля), приводя к образованию β-аминопроизводных. Процесс не сопровождается выделением побочных продуктов, то есть является на 100% атом-экономным, условия – мягкими, а выходы – практически количественными. Разработанный метод может обеспечить реализацию малозатратных технологий получения наукоемких продуктов с высокой добавленной стоимостью, а также высокотехнологичных веществ и материалов.

Высокая реакционная способность акрилатного фрагмента обусловлена электроноакцепторным влиянием карбонильной группы, что приводит к поляризации двойной связи и облегчает нуклеофильную атаку. В результате формируются стабильные аддукты с сохранением триалкоксисиланового фрагмента, необходимого для последующего гидролиза и формирования силоксановой сетки. Полученные соединения **3a,b** представляют собой перспективные прекурсоры для получения кремнийорганических покрытий с регулируемыми функциональными свойствами.

Подбор условий гидролиза триалкоксисиланов. Формирование кремнийорганического покрытия начинается со стадии кислотно-катализируемого гидролиза триалкоксисиланов **3a,b** с образованием соответствующих силанолов (рис. 2). В присутствии воды и кислотного катализатора происходит последовательное замещение этоксигрупп на гидроксильные группы с выделением этанола. Образующиеся силанолы в дальнейшем способны вступать в реакции конденсации с формиро-

ванием силоксановых связей Si-O-Si и закреплением на гидроксильной поверхности металла.

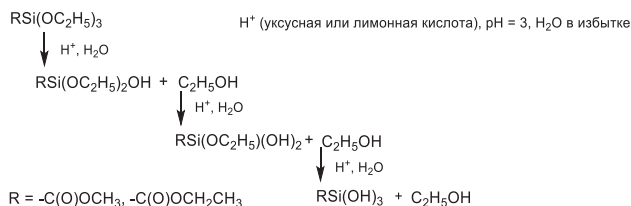


Рис. 2. Реакции кислотного гидролиза триалкоксисиланов

Fig. 2. Acid hydrolysis of trialkoxysilanes

Механизм кислотно-катализируемого гидролиза (рис. 3) включает протонирование атома кислорода алкоксигруппы, что приводит к повышению электрофильности атома кремния и облегчает нуклеофильную атаку молекулы воды. На промежуточной стадии формируется протонированный пятикоординатный комплекс, после чего происходит отщепление этанола и регенерация катализатора. Подобный механизм подробно описан в литературе для алкоксисиланов и подтвержден кинетическими и спектроскопическими исследованиями [20, 21].

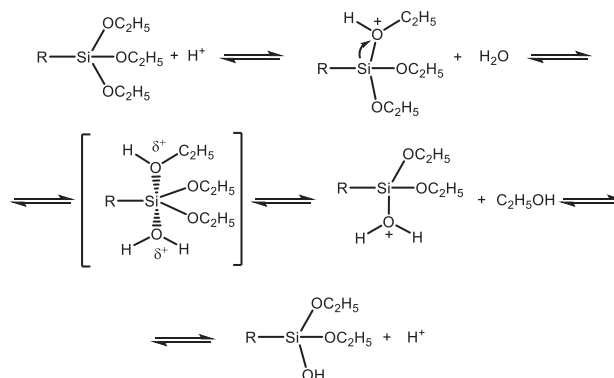


Рис. 3. Механизм катализируемого кислотой гидролиза триалкоксисиланов

Fig. 3. Mechanism of acid-catalyzed hydrolysis of trialkoxysilanes

Экспериментально установлено, что скорость гидролиза триалкоксисиланов определяется pH среды и природой кислоты. Наиболее стабильные и прозрачные растворы получены при pH ≈ 3 в присутствии лимонной либо уксусной кислоты. Применение более сильных минеральных кислот сопровождается помутнением растворов, что указывает на протекание ускоренной гомо-конденсации силанолов с образованием олигомерных силоксановых частиц. В нейтральной среде (pH 6–7) скорость гидролиза существенно снижается. Продолжительность гидролиза для соединения **3a** составила 36 ч, а для **3b** – 48 ч (табл. 1).

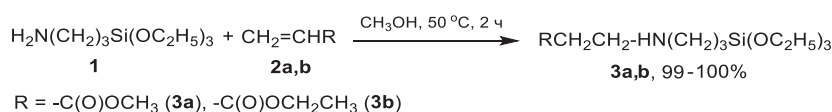


Рис. 1. Реакция 3-триэтоксисилилпропиламина с акрилатами

Fig. 1. Reaction of 3-triethoxysilylpropylamine with acrylates

Различие во времени гидролиза, вероятно, связано со стерическим влиянием алкильного заместителя в акрилатном фрагменте, что отражается на доступности реакционного центра кремния и скорости протекания гидролитического замещения. Проведены эксперименты по гидролизу синтезированных триалкоксисиланов в водно-спиртовых растворах. Введение этанола приводит к увеличению продолжительности процесса по сравнению с водной средой, это указывает на изменение протекания гидролиза в водно-спиртовой среде.

Таблица 1. Визуальные наблюдения за изменением консистенции растворов

Table 1. Visual observations of changes in the solutions consistency

Время, ч	pH							
	3		4		5		6	
	Соединение							
	3a	3b	3a	3b	3a	3b	3a	3b
1	X ₁	X ₁	X ₁	X ₁	X ₁	X ₁	X ₁	X ₂
2	X ₁	X ₁	X ₁	X ₁	X ₁	X ₁	X ₁	X ₁
4	X ₁	X ₁	X ₁	X ₁	X ₁	X ₁	X ₁	X ₁
6	B ₁	B ₁	B ₁	B ₁	B ₁	B ₁	B ₁	B ₁
12	B ₂	B ₁	B ₂	B ₁	B ₁	B ₁	B ₁	B ₁
24	П	B ₂	B ₂	B ₂	B ₁	B ₁	B ₁	B ₁
48	–	П	П	B ₂	B ₂	B ₂	B ₂	B ₁
72	–	–	–	B ₂	B ₂	B ₂	B ₂	B ₂
96	–	–	–	B ₃	B ₂	B ₃	B ₂	B ₂
120	–	–	–	П	П	П*	П*	B ₃
144	–	–	–	–	–	–	–	П*

Примечание. X₁ – мелкие белые хлопья по всему объему; X₂ – крупные белые хлопья; V₁ – мелкая взвесь на дне; V₂ – небольшое количество взвеси на дне; V₃ – мелкая взвесь по всему объему; П – прозрачный раствор; П* – прозрачный раствор после встряхивания.

Ход реакции контролировали методом тонкослойной хроматографии (SiO₂, вода, ультрафиолетовая детекция). Отмечено постепенное уменьшение интенсивности пятен исходных соединений и появление более полярных зон, соответствующих продуктам гидролиза, что подтверждает протекание процесса. Визуальные наблюдения (см. табл. 1) согласуются с полученными данными: на начальных стадиях фиксируется образование хлопьевидных частиц, далее – мелкодисперсной взвеси и последующее осветление раствора. Быстрее всего прозрачное состояние раствора достигается при pH ≈ 3, тогда как при pH 5–6 стабилизация системы замедляется; для соединения **3b** этот процесс протекает медленнее, чем для **3a**.

Таким образом, гидролиз синтезированных триалкоксисиланов наиболее эффективно протекает в слабокислой среде в присутствии органических кислот.

Морфология и элементный состав поверхности. По данным сканирующей электронной микроскопии, покрытия на основе триалкоксисиланов **3a** и **3b**, полученные из растворов оптимальной концентрации (4–7%), формируют сплошное тонкое покрытие без выраженных дефектов. Поверхность характеризуется равномерным распределением силоксанового слоя и отсутствием крупных агрегатов, что свидетельствует о контролируемом протекании гидролиза и последующей конденсации (рис. 4). Спектр исходной стали характеризуется преобладанием линий Fe и Mn, отсутствием сигналов Si, что соответствует составу металлической подложки (см. рис. 4, а). После нанесения покрытия на основе **3a** в спектре фиксируется появление характерного пика Si (~1,7–1,8 кэВ), а также увеличение интенсивности сигналов C и O по сравнению с исходным образцом (рис. см. 4, b).

Следует отметить, что в спектрах образцов с кремнийорганическим покрытием наблюдаются сигналы Fe, интенсивность которых по сравнению с исходной сталью снижается. Сохранение сигналов Fe в спектрах образцов с покрытием может быть обусловлено тем, что толщина сформированного слоя (≈120–350 нм) меньше глубины генерации характеристического рентгеновского электронного излучения в условиях анализа. Вследствие этого часть сигнала формируется в металлической подложке, что приводит к регистрации ослабленных линий Fe (табл. 2).

Увеличение концентрации органосиланов (выше 12–15%) ухудшает защитную способность вследствие увеличения толщины и плотности покрытия, приводящего к растрескиванию покрытия на поверхности металла (рис. 5, а). Использование водно-спиртовых растворов оказывает заметное влияние на морфологию покрытия. Добавление этанола снижает диэлектрическую проницаемость среды и уменьшает эффективность воды, что приводит к замедлению гидролитического замещения алкоксигрупп. В этих условиях возрастает вероятность протекания процессов межмолекулярной конденсации в растворе до стадии осаждения на металлическую поверхность. В результате формируются олигомерные частицы, которые при нанесении образуют островковую или неравномерную структуру силоксанового слоя (рис. 5, b). Подобный эффект особенно характерен для соединения **3b**, что может быть связано со стерическим влиянием заместителя.

Таким образом, морфологический и элементный анализ подтверждают формирование на поверхности стали сплошного силоксанового слоя. При этом покрытие на основе соединения **3a** характеризуется более равно-

Таблица 2. Элементный состав поверхности металлических образцов

Table 2. Elemental composition of the metal samples surface

Образец стали	C	N	O	Al	Si	Mn	Fe	Толщина покрытия, нм
Исходный	2,02	–	–	–	–	0,50	97,55	–
3a	14,79	5,14	7,78	0,06	2,51	0,29	69,43	243
3b	14,39	4,16	7,06	–	2,23	0,12	72,08	323

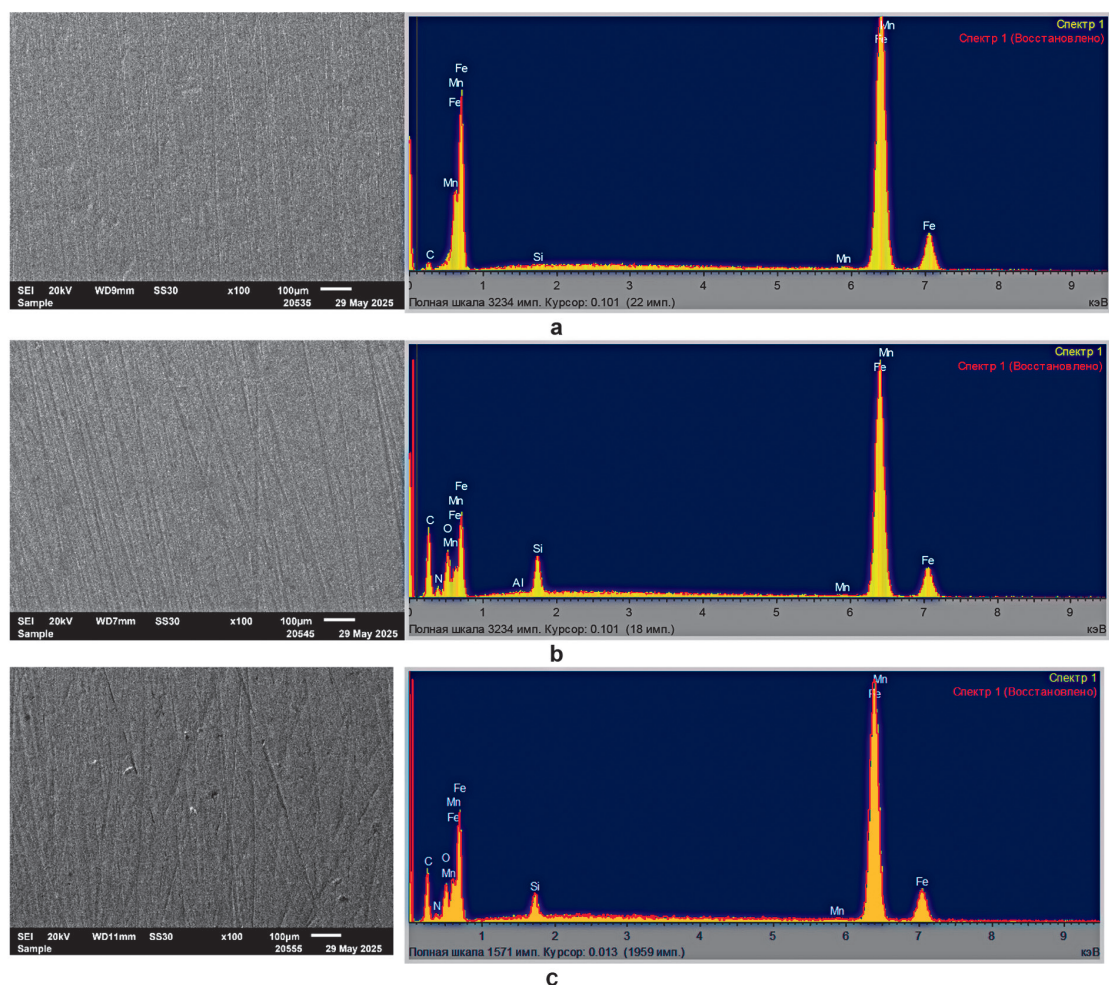


Рис. 4. Микроснимки и спектры поверхности образцов стали без покрытия (а) и с осажденным кремнийорганическим покрытием на основе соединений 3а (b) и 3b (c)

Fig. 4. Micrographs and spectra of the surface of uncoated (a) and deposited organosilicon coated steel samples based on compounds 3a (b) and 3b (c)

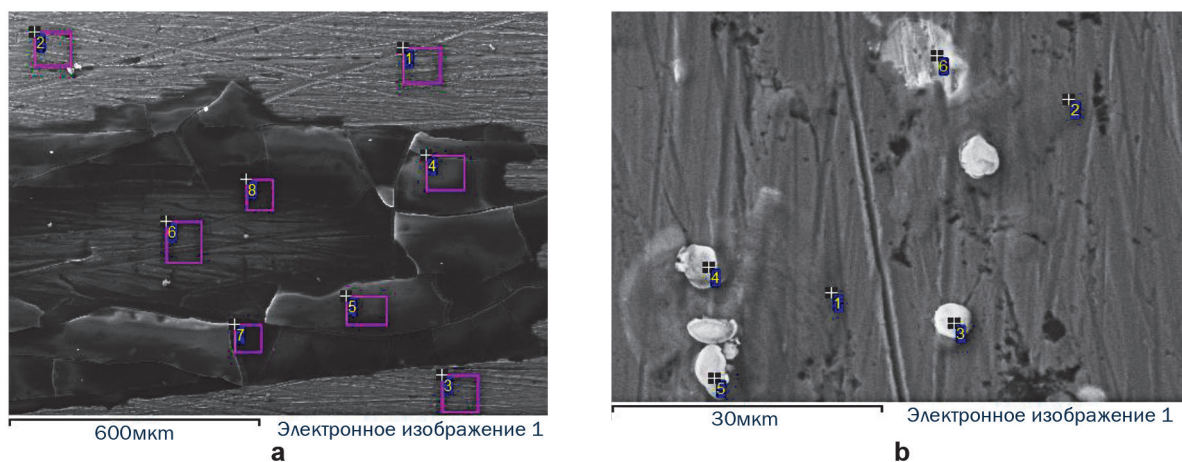


Рис. 5. Микроснимки поверхности стали с осажденным покрытием из водного раствора с содержанием органосилана 3а 15% масс. (а) и из водно-спиртового раствора на основе соединения 3b (b)

Fig. 5. Micrographs of the surface of steel with the coating deposited from the aqueous solution with organosilane 3a content of 15% wt (a) and from the aqueous alcohol solution based on compound 3b (b)

мерным распределением по поверхности по сравнению с аналогом на основе **3b**, что согласуется с различиями в защитных свойствах. В результате установлена взаимосвязь между морфологическими особенностями и степенью однородности покрытия, с одной стороны, и составом, концентрацией рабочего раствора, а также природой органосилана – с другой.

Оценка защитных свойств покрытий. Формирование защитного слоя включает гидролиз алкоксигрупп с образованием силанолов и их последующее закрепление на гидроксильной поверхности стали с межмолекулярной конденсацией (рис. 6). Образующиеся связи типа Me-O-Si-R обеспечивают прочное адгезионное закрепление покрытия, а пространственно-сшитая силоксановая сетка выполняет барьерную функцию, снижая доступ коррозионно-активных компонентов к металлической подложке [22, 23].

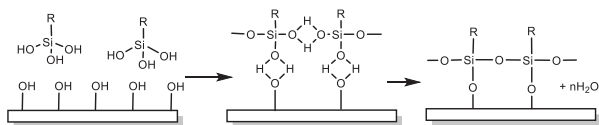


Рис. 6. Схема образования кремнийорганических покрытий на поверхности металла

Fig. 6. Scheme of formation of organosilicon coatings on the metal surface

Защитные свойства сформированных покрытий оценивали методом капельной пробы по Акимову. Нанесение силоксанового слоя приводит к увеличению времени изменения окраски реактива по сравнению с исходной сталью, что свидетельствует о снижении коррозионных процессов (рис. 7).

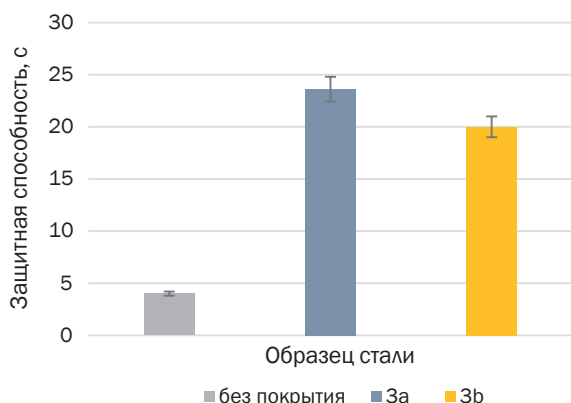


Рис. 7. Защитная способность поверхности стали на исходном образце и на поверхности кремнийорганического покрытия

Fig. 7. Protective ability of the steel surface on the initial sample and on the surface of the organosilicon coating

Влияние концентрации и pH растворов на защитные свойства кремнийорганического покрытия. Исследовано влияние концентрации триалкоксиланов (1–15%) на процесс формирования кремнийорганических покрытий и их защитные свойства. Полученные зависимости имеют выраженный максимум (рис. 8), что указывает на взаимосвязанное и конкурирующее протекание процессов

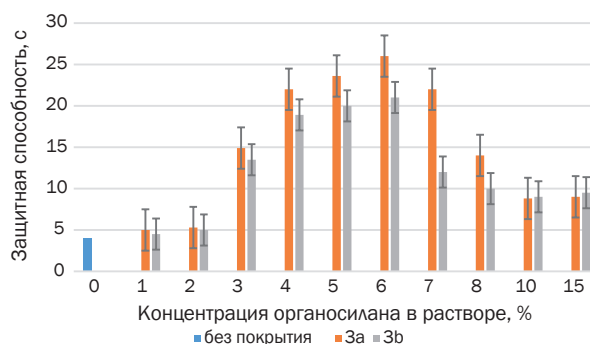


Рис. 8. Зависимость защитной способности кремнийорганических покрытий от концентрации органосилана в растворе

Fig. 8. Protective ability of organosilicon coatings versus organosilane concentration in solution

гидролиза и последующей конденсации силанолов на поверхности металлической подложки.

При низких концентрациях (1–2%) количество реакционноспособных силанольных групп недостаточно для формирования сплошной пространственно-сшитой силоксановой сетки. В результате образуется тонкий и неполный защитный слой, что отражается в сниженных значениях защитной способности. В интервале 4–7% достигается оптимальный баланс между скоростью гидролиза и степенью межмолекулярной конденсации. В этих условиях формируются наиболее равномерные и стабильные покрытия с максимальными значениями защитной способности. Повышение концентрации выше 8% нецелесообразно, так как не приводит к дальнейшему росту защитной способности. При использовании 10–15%-х растворов формируемое кремнийорганическое покрытие становится менее равномерным. В частности, при использовании 10%-го раствора наблюдаются участки локального накопления покрытия, что указывает на ускоренную конденсацию силанолов в объеме раствора до стадии осаждения на металлическую поверхность. Такая неоднородность распределения силоксанового слоя снижает эффективность защитных свойств покрытия. При этом использование органосилана **3a** обеспечивает более высокие значения защитной способ-

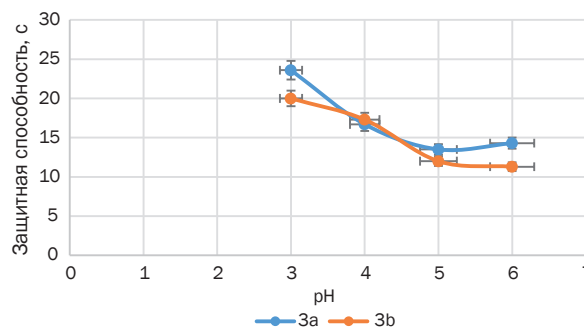


Рис. 9. Зависимость защитной способности покрытий от pH раствора

Fig. 9. Protective ability of coatings versus solution pH

ности по сравнению с **3b**, что согласуется с данными морфологического анализа.

Сходная закономерность выявлена при изменении pH: наибольшее значение защитной способности достигаются при pH 3, что соответствует оптимальному соотношению процессов гидролиза и конденсации. При более высоких значениях pH защитная способность снижается (рис. 9).

Таким образом, повышение коррозионной стойкости стали обусловлено формированием равномерного, прочно связанного силоксанового слоя, обеспечивающего эффективную барьерную защиту. Дополнительное усиление защитных свойств достигается за счет введения полимеризуемых функциональных групп в аминопропильный фрагмент молекулы 3-аминопропилтриэтоксисилана. В частности, акрилатные заместители участвуют в формировании органической полимерной фазы, способствуя образованию более плотной органичесилоксановой сетки с высокой степенью сшивки, что приводит к снижению проницаемости и повышению коррозионной стойкости покрытий [24]. В то же время покрытия, полученные на основе немодифицированного 3-аминопропилтриэтоксисилана, обеспечивают хорошую адгезию к подложке, однако вследствие гидрофильного

характера аминогрупп и ограниченной плотности могут уступать в коррозионной стойкости модифицированным системам [25].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе синтезированы функциональные триалкоксисиланы с различной природой акрилатного заместителя и исследованы условия формирования кремнийорганических покрытий на поверхности стали. Установлено влияние pH растворов и состава растворителя на процесс гидролиза, при этом наиболее стабильные системы формируются при pH 3 и кислотном катализе (уксусная или лимонная кислота). Показано, что оптимальная концентрация рабочих растворов составляет 4–7%, что обеспечивает образование равномерного силоксанового слоя. Морфологический и элементный анализ подтвердили формирование на поверхности стали кремнийорганического покрытия, закрепленного за счет образования связей Me-O-Si-R и силоксановой сетки. На основании проведенных исследований показана возможность использования синтезированных триалкоксисиланов для получения эффективных антикоррозионных кремнийорганических покрытий праймерного типа в составе многослойных защитных систем.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Fawzy J., El-Shorbagy R.M., Khalifa W. Corrosion failures in oil and gas fields: review and case studies // International Journal of Materials Technology and Innovation. 2024. Vol. 4, no. 2. P. 30–38. DOI: 10.21608/ijmti.2024.328485.1112.
2. Выбойщик М.А., Кудашов Д.В., Князькин С.А., Федотова А.В., Казадаев Д.С. Коррозионно-механическое разрушение электросварных труб в нефтепромысловых средах высокой агрессивности // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2020. N 3. С. 7–18. DOI: 10.18323/2073-5073-2020-3-7-18. EDN: CLGFUX.
3. Федоров А.С., Карасев В.С., Алексеева Е.А., Алхименко А.А., Шапошников Н.О. Проблемы подбора коррозионностойких сталей и сплавов в нефтегазовой отрасли под условия эксплуатации // Известия высших учебных заведений. Черная Металлургия. 2024. Т. 67. N 3. С. 340–350. DOI: 10.17073/0368-0797-2024-3-340-350. EDN: TTPSJR.
4. Manu K.C., Madhushree C., Chandini M.S., Shree N., Hemanth S., Jeevan T.P. Corrosion in steel structures: a review // Journal of Mines, Metals and Fuels. 2025. Vol. 73, no. 1. P. 189–198. DOI: 10.18311/jmmf/2025/46985.
5. Hou B., Li X., Ma X., Du C., Zhang D., Zheng M., et al. The cost of corrosion in China // Npj Materials Degradation. 2017. Vol. 1. P. 4. DOI: 10.1038/s41529-017-0005-2.
6. Chen Zh., Zhou K., Lu X., Lam Y.C. A review on the mechanical methods for evaluating coating adhesion // Acta Mechanica. 2014. Vol. 225, no. 2. P. 431–452. DOI: 10.1007/s00707-013-0979-y.
7. Krüger T., Amkreutz M., Schiffels P., Schneider B., Hennemann O.-D., Frauenheim T. Theoretical study of the interaction between selected adhesives and oxide surfaces // The Journal of Physical Chemistry B. 2005. Vol. 109, no. 11. P. 5060–5066. DOI: 10.1021/jp0448651.
8. Qian H., Jiang B. Silicone resin applications for heat-resistant coatings: a review // Polymer Science, Series C. 2023. Vol. 65. P. 206–219. DOI: 10.1134/S1811238223700443.
9. Czakaj J., Sztorch B., Romanczuk-Ruszk E., Brząkański D., Przekop R.E. Organosilicon compounds in hot-melt adhesive technologies // Polymers. 2023. Vol. 15, no. 18. P. 3708. DOI: 10.3390/polym15183708.
10. Cui G., Bi Zh., Wang Sh., Liu J., Xing X., Li Z., et al. A comprehensive review on smart anti-corrosive coatings // Progress in Organic Coatings. 2020. Vol. 148. P. 105821. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2020.105821.
11. Wang T., Chen S., Feng H., Cao L., Zhao Z., Li W. Modification strategy of siloxane antifouling coating: adhesion strength, static antifouling, and self-healing properties // Surface Science and Technology. 2023. Vol. 1. P. 28. DOI: 10.1007/s44251-023-00028-z.
12. Kowalewska A., Majewska-Smolarek K. Self-healing antimicrobial silicones – mechanisms and applications // Polymers. 2023. Vol. 15, no. 19. P. 3945. DOI: 10.3390/polym15193945.
13. Wang X., Shen J. A review of contamination-resistant antireflective sol-gel coatings // Journal of Sol-Gel Science and Technology. 2012. Vol. 61, no. 1. P. 206–212. DOI: 10.1007/s10971-011-2615-4.
14. Al-Saadi S., Singh Raman R.K. Silane coatings for corrosion and microbiologically influenced corrosion resistance of mild steel: a review // Materials. 2022. Vol. 15, no. 21. P. 7809. DOI: 10.3390/ma15217809.
15. Plueddemann E.P. Silane coupling agent. New York: Springer, 1991. 253 p. DOI: 10.1007/978-1-4899-2070-6.
16. Silanes and other coupling agents / ed. K.L. Mittal. Utrecht – Boston – Tokyo, 2000. Vol. 2. 292 p.
17. Ishida H. Recent progress in the studies of molecular and microstructure of interfaces in composites, coatings and adhesive joints // Adhesion aspects of polymeric coatings / ed. K.L. Mittal. New York – London: Plenum Press, 2011. P. 45–106. DOI: 10.1007/978-1-4613-3658-7.
18. Adamovich S.N., Nalibayeva A.M., Abdikalykov Y.N., Ushakov I.A., Oborina E.N., Rozentsveig I.B. New functional alkoxysilanes and silatranes: synthesis, structure, prop-

erties, and possible applications // *International Journal of Molecular Sciences*. 2023. Vol. 24, no. 18. P. 13818. DOI: 10.3390/ijms241813818.

19. Блок Р., Лестранж Р., Цвейг Г. Хроматография на бумаге / пер. с англ. М.: Издательство иностранной литературы, 1954. 212 с.

20. Osterholtz F.D., Pohl E.R. Kinetics of the hydrolysis and condensation of organofunctional alkoxysilanes: a review // *Journal of Adhesion Science and Technology*. 1992. Vol. 6, no. 1. P. 127-149. DOI: 10.1163/156856192x00106.

21. Pohl E.R., Osterholtz F.D. Kinetics and mechanism of aqueous hydrolysis and condensation of alkyltrialkoxysilanes // *Molecular characterization of composite interfaces* / eds H. Ishida, G. Kumar. New York: Springer, 1985. P. 157-170. DOI: 10.1007/978-1-4899-2251-9.

22. Pokorný P., Kouřil M. Predicted corrosion performance of organofunctional silane coated steel reinforcement

for concrete structures: an overview // *Buildings*. 2024. Vol. 14, no. 6. P. 1756. DOI: 10.3390/buildings14061756.

23. Gladkikh N., Petrunin M., Maksaeva L., Yurasova T. Adsorption of organosilanes on the surface of aluminium and the formation of organosilane films to protect it from corrosion // *Materials*. 2021. Vol. 14, no. 19. P. 5757. DOI: 10.3390/ma14195757.

24. Al-Saadi S., Singh Raman R.K. Silane coatings for corrosion and microbiologically influenced corrosion resistance of mild steel: a review // *Materials*. 2022. Vol. 15, no. 21. P. 7809. DOI: 10.3390/ma15217809.

25. Liu Y., Zhang S., He Y., Chen C., Zhang C., Xie P., et al. APTES modification of molybdenum disulfide to improve the corrosion resistance of waterborne epoxy coating // *Coatings*. 2021. Vol. 11, no. 2. P. 178. DOI: 10.3390/coatings11020178.

REFERENCES

1. Fawzy J., El-Shorbagy R.M., Khalifa W. Corrosion failures in oil and gas fields: review and case studies. *International Journal of Materials Technology and Innovation*. 2024;4(2):30-38. DOI: 10.21608/ijmti.2024.328485.1112.

2. Vyboyschik M.A., Kudashov D.V., Knyazkin S.A., Fedotova A.V., Kazadaev D.S. Stress-corrosion fracture of electric-welded pipes in the high-aggressiveness oilfield mediums. *Vektor nauki Tol'yatinskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2020;3:7-18. (In Russian). DOI: 10.18323/2073-5073-2020-3-7-18. EDN: CLGFUX.

3. Fedorov A.S., Karasev V.S., Alekseeva E.L., Al'khimenko A.A., Shaposhnikov N.O. Problems of selection of corrosion-resistant steels and alloys in oil and gas industry for operating conditions. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2024;67(3):340-350. (In Russian). DOI: 10.17073/0368-0797-2024-3-340-350. EDN: TTPSJR.

4. Manu K.C., Madhushree C., Chandini M.S., Shree N., Hemanth S., Jeevan T.P. Corrosion in steel structures: a review. *Journal of Mines, Metals and Fuels*. 2025;73(1):189-198. DOI: 10.18311/jmmf/2025/46985.

5. Hou B., Li X., Ma X., Du C., Zhang D., Zheng M., et al. The cost of corrosion in China. *Npj Materials Degradation*. 2017;1:4. DOI: 10.1038/s41529-017-0005-2.

6. Chen Zh., Zhou K., Lu X., Lam Y.C. A review on the mechanical methods for evaluating coating adhesion. *Acta Mechanica*. 2014;225(2):431-452. DOI: 10.1007/s00707-013-0979-y.

7. Krüger T., Amkreutz M., Schiffels P., Schneider B., Hennemann O.-D., Frauenheim T. Theoretical study of the interaction between selected adhesives and oxide surfaces. *The Journal of Physical Chemistry B*. 2005;109(11):5060-5066. DOI: 10.1021/jp0448651.

8. Qian H., Jiang B. Silicone resin applications for heat-resistant coatings: a review. *Polymer Science, Series C*. 2023;65:206-219. DOI: 10.1134/S1811238223700443.

9. Czakaj J., Sztorch B., Romanczuk-Ruszek E., Brząkalski D., Przekop R.E. Organosilicon compounds in hot-melt adhesive technologies. *Polymers*. 2023;15(18):3708. DOI: 10.3390/polym15183708.

10. Cui G., Bi Zh., Wang Sh., Liu J., Xing X., Li Z., et al. A comprehensive review on smart anti-corrosive coatings. *Progress in Organic Coatings*. 2020;148:105821. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2020.105821.

11. Wang T., Chen S., Feng H., Cao L., Zhao Z., Li W. Modification strategy of siloxane antifouling coating: adhesion strength, static antifouling, and self-healing properties. *Surface Science and Technology*. 2023;1:28. DOI: 10.1007/s44251-023-00028-z.

12. Kowalewska A., Majewska-Smolarek K. Self-healing antimicrobial silicones – mechanisms and applications. *Polymers*. 2023;15(19):3945. DOI: 10.3390/polym15193945.

13. Wang X., Shen J. A review of contamination-resistant antireflective sol-gel coatings. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*. 2012;61(1):206-212. DOI: 10.1007/s10971-011-2615-4.

14. Al-Saadi S., Singh Raman R.K. Silane coatings for corrosion and microbiologically influenced corrosion resistance of mild steel: a review. *Materials*. 2022;15(21):7809. DOI: 10.3390/ma15217809.

15. Plueddemann E.P. *Silane coupling agent*. New York: Springer; 1991, 253 p. DOI: 10.1007/978-1-4899-2070-6.

16. Mittal K.L. *Silanes and other coupling agents*. Utrecht – Boston – Tokyo; 2000, vol. 2, 292 p.

17. Ishida H. Recent progress in the studies of molecular and microstructure of interfaces in composites, coatings and adhesive joints. In: Mittal K.L. (ed.). *Adhesion aspects of polymeric coatings*. New York – London: Plenum Press; 2011, p. 45-106. DOI: 10.1007/978-1-4613-3658-7.

18. Adamovich S.N., Nalibayeva A.M., Abdikalykov Y.N., Ushakov I.A., Oborina E.N., Rozentsveig I.B. New functional alkoxysilanes and silatranes: synthesis, structure, properties, and possible applications. *International Journal of Molecular Sciences*. 2023;24(18):13818. DOI: 10.3390/ijms241813818.

19. Block R.J., LeStrange R., Zweig G. Paper chromatography; 1952, 195 p. (Russ. ed.: *Hromatografiya na bumage*. Moscow: Izdatel'stvo inostrannoj literatury; 1954, 212 p.).

20. Osterholtz F.D., Pohl E.R. Kinetics of the hydrolysis and condensation of organofunctional alkoxysilanes: a review. *Journal of Adhesion Science and Technology*. 1992;6(1):127-149. DOI: 10.1163/156856192x00106.

21. Pohl E.R., Osterholtz F.D. Kinetics and mechanism of aqueous hydrolysis and condensation of alkyltrialkoxysilanes. In: Ishida H., Kumar G. (eds). *Molecular characterization of composite interfaces*. New York: Springer; 1985, p. 157-170. DOI: 10.1007/978-1-4899-2251-9.

22. Pokorný P., Kouřil M. Predicted corrosion performance of organofunctional silane coated steel reinforcement for concrete structures: an overview. *Buildings*. 2024;14(6):1756. DOI: 10.3390/buildings14061756.

23. Gladkikh N., Petrunin M., Maksaeva L., Yurasova T. Adsorption of organosilanes on the surface of aluminium and the formation of organosilane films to protect it from corrosion. *Materials*. 2021;14(19):5757. DOI: 10.3390/ma14195757.

24. Al-Saadi S., Singh Raman R.K. Silane coatings for corrosion and microbiologically influenced corrosion resistance of mild steel: a review. *Materials*. 2022;15(21):7809. DOI: 10.3390/ma15217809.

25. Liu Y., Zhang S., He Y., Chen C., Zhang C., Xie P., et al. APTES modification of molybdenum disulfide to improve the corrosion resistance of waterborne epoxy coating. *Coatings*. 2021;11(2):178. DOI: 10.3390/coatings11020178.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Журинов Мурат Журинович,

д.х.н., академик Национальной академии наук Республики Казахстан, президент – научный руководитель, Институт топлива, катализа и электрохимии им. Д.В. Сокольского, 050010, г. Алматы, ул. Кунаева, 142, Республика Казахстан, генеральный директор, Научно-исследовательский институт нефтепереработки и нефтехимии, 050010, Алматы, ул. Кунаева, 142, Республика Казахстан, mur.zhurinov@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0009-5003-5037>

Налибаева Арайлым Муратовна,

к.х.н., ведущий научный сотрудник, Институт топлива, катализа и электрохимии им. Д. В. Сокольского, 050010, г. Алматы, ул. Кунаева, 142, Республика Казахстан, aray77@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3976-5134>

Оборина Елизавета Николаевна,

к.х.н., старший научный сотрудник, Иркутский институт химии им. А.Е. Фаворского СО РАН, 664033, г. Иркутск, ул. Фаворского, 1, Российская Федерация, oborina@irioch.irk.ru
<https://orcid.org/0000-0002-4770-3403>

Розенцвейг Игорь Борисович,

д.х.н., доцент, заведующий лабораторией, Иркутский институт химии им. А.Е. Фаворского СО РАН, 664033, г. Иркутск, ул. Фаворского, 1, Российская Федерация, профессор, Иркутский государственный университет, 664003, г. Иркутск, ул. Карла Маркса, 1, Российская Федерация, i_roz@irioch.irk.ru
<https://orcid.org/0000-0001-7817-7816>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Murat Zh. Zhurynov,

Dr. Sci. (Chemistry), Academician of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, President – Scientific Director, D.V. Sokolsky Institute of Fuel, Catalysis and Electrochemistry, 142, Kunaev St., Almaty, 050010, Republic of Kazakhstan, General Director, Scientific Research Institute of Petroleum Refining and Petrochemistry 142, Kunaev St., Almaty, 050010, Republic of Kazakhstan, mur.zhurinov@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0009-5003-5037>

Arailym M. Nalibayeva,

Cand. Sci. (Chemistry), Leading Researcher, D.V. Sokolsky Institute of Fuel, Catalysis and Electrochemistry, 142, Kunaev St., Almaty, 050010, Republic of Kazakhstan, aray77@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3976-5134>

Elizaveta N. Oborina,

Cand. Sci. (Chemistry), Senior Researcher, A.E. Favorsky Irkutsk Institute of Chemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 1, Favorsky St., Irkutsk, 664033, Russian Federation, oborina@irioch.irk.ru
<https://orcid.org/0000-0002-4770-3403>

Igor B. Rozentsveig,

Dr. Sci. (Chemistry), Associate Professor, Head of the Laboratory, A.E. Favorsky Irkutsk Institute of Chemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 1, Favorsky St., Irkutsk, 664033, Russian Federation, Professor, Irkutsk State University, 1, Karl Marks St., Irkutsk, 664003, Russian Federation, i_roz@irioch.irk.ru
<https://orcid.org/0000-0001-7817-7816>

Адамович Сергей Николаевич,
д.х.н., ведущий научный сотрудник,
Иркутский институт химии
им. А.Е. Фаворского СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Фаворского, 1,
Российская Федерация,
mir@irioch.irk.ru
<https://orcid.org/0000-0003-1276-924X>

Нефедов Александр Николаевич,
руководитель центра компетенции
по проблемам коррозии,
Институт топлива, катализа
и электрохимии им. Д.В. Сокольского,
050010, г. Алматы, ул. Кунаева, 142,
Республика Казахстан,
a.nefedov@ifce.kz
<https://orcid.org/0000-0002-9070-0398>

Пузикова Дарья Сергеевна,
д.н., старший научный сотрудник,
Институт топлива, катализа
и электрохимии им. Д.В. Сокольского,
050010, г. Алматы, ул. Кунаева, 142,
Республика Казахстан,
d.puzikova@ifce.kz
<https://orcid.org/0000-0001-5275-4769>

Леонтьева Ксения Александровна,
младший научный сотрудник,
Институт топлива, катализа
и электрохимии им. Д.В. Сокольского,
050010, г. Алматы, ул. Кунаева, 142,
Республика Казахстан,
leontyeva.xeniya@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-4740-1720>

Хусурова Гулинур Марсовна,
научный сотрудник,
Институт топлива, катализа
и электрохимии им. Д.В. Сокольского,
050010, г. Алматы, ул. Кунаева, 142,
Республика Казахстан,
gulinur_k@bk.ru
<https://orcid.org/0000-0001-8700-7472>

Абдикалыков Ерлан Нуржанулы,
младший научный сотрудник,
Институт топлива, катализа и электрохимии
им. Д. В. Сокольского,
050010, г. Алматы, ул. Д. Кунаева, 142,
Республика Казахстан,
abdikalykov.yerlan@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-6630-9962>

Sergei N. Adamovich,
Dr. Sci. (Chemistry), Leading Researcher,
A.E. Favorsky Irkutsk Institute of Chemistry,
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
1, Favorsky St., Irkutsk, 664033,
Russian Federation,
mir@irioch.irk.ru
<https://orcid.org/0000-0003-1276-924X>

Alexandr N. Nefedov,
Cand. Sci. (Chemistry),
Head of the Corrosion Competence Center,
D.V. Sokolsky Institute of Fuel,
Catalysis and Electrochemistry,
142, Kunaev St., Almaty, 050010,
Republic of Kazakhstan,
a.nefedov@ifce.kz
<https://orcid.org/0000-0002-9070-0398>

Darya S. Puzikova,
PhD, Senior Researcher,
D.V. Sokolsky Institute of Fuel,
Catalysis and Electrochemistry,
142, Kunaev St., Almaty, 050010,
Republic of Kazakhstan,
d.puzikova@ifce.kz
<https://orcid.org/0000-0001-5275-4769>

Xeniya A. Leontyeva,
Junior Researcher,
D.V. Sokolsky Institute of Fuel,
Catalysis and Electrochemistry,
142, Kunaev St., Almaty, 050010,
Republic of Kazakhstan,
leontyeva.xeniya@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-4740-1720>

Gulinur M. Khussurova,
Researcher,
D.V. Sokolsky Institute of Fuel,
Catalysis and Electrochemistry,
142, Kunaev St., Almaty, 050010,
Republic of Kazakhstan,
gulinur_k@bk.ru
<https://orcid.org/0000-0001-8700-7472>

Yerlan N. Abdikalykov,
Junior Researcher,
D.V. Sokolsky Institute of Fuel,
Catalysis and Electrochemistry,
142, Kunaev st., Almaty, 050010,
Republic of Kazakhstan,
abdikalykov.yerlan@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-6630-9962>

Вклад авторов

М.Ж. Журинов – научное руководство, получение финансирования.
А.М. Налибаева – разработка концепции, проведение исследования, написание черновика рукописи.
Е.Н. Оборина – проведение исследования.
И.Б. Розенцвейг – редактирование рукописи.
С.Н. Адамович – разработка концепции, разработка методологии.
А.Н. Неведов – административное руководство исследовательским проектом.
Д.С. Пузикова – курирование данных.
К.А. Леонтьева – проведение исследования.
Г.М. Хусурова – предоставление ресурсов.
Е.Н. Абдикалыков – проведение исследования, визуализация.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Поступила в редакцию 27.02.2026.
Одобрена после рецензирования 28.03.2026.
Принята к публикации 29.04.2026.

Contribution of the authors

Murat Zh. Zhurynov – supervision, funding acquisition.
Arailym M. Nalibayeva – conceptualization, investigation, writing – original draft.
Elizaveta N. Oborina – investigation.
Igor B. Rozentsveig – editing.
Sergei N. Adamovich – conceptualization, methodology.
Alexandr N. Nefedov – project administration.
Darya S. Puzikova – data curation.
Xeniya A. Leontyeva – investigation.
Gulinur M. Khussurova – resources.
Yerlan N. Abdikalykov – investigation, visualization.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 27.02.2026.
Approved after reviewing 28.03.2026.
Accepted for publication 29.04.2026.