

Наномодификация водных стирол-акриловых лакокрасочных составов кремнийорганическими добавками

Анна Сергеевна Сорокина^{1,2*} , Людмила Юрьевна Комарова¹ , Никита Игоревич Копылов² 

¹ Московский политехнический университет, 107023, Москва, Большая Семёновская, 38, Российская Федерация

² ЗАО «Декарт», 141400, Химки, Ленинградская ул., вл. 31, Российская Федерация

* Автор, ответственный за переписку: e-mail: any.sorokina2015@yandex.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Современные тенденции в строительной и лакокрасочной промышленности направлены на создание экологически безопасных материалов с улучшенными защитными и декоративными свойствами. Водные стирол-акриловые дисперсии широко применяются для окраски фасадов и деревянных конструкций, однако к их эксплуатационным характеристикам, особенно гидрофобности, влагостойкости и адгезионной прочности, часто предъявляют повышенные требования. Перспективным методом наномодификации является введение кремнийорганических соединений, способных целенаправленно изменять свойства поверхности и межфазные взаимодействия в полимерной матрице. **Методы и материалы.** Исследование проводилось на стирол-акриловой дисперсии с использованием трех типов добавок: смачивателя на основе полиэфирмодифицированного полисилоксана, гидрофобизатора в виде полисилоксановой эмульсии и восковой силиконовой эмульсии. Оценка свойств покрытий проводилась по стандартным методикам ГОСТ. **Результаты и обсуждение.** Установлено, что введение гидрофобизатора обеспечивает снижение поверхностной энергии покрытия с 45,9 до 9,6 мН/м и переход поверхности из гидрофильного состояния с краевым углом смачивания, равным 54°, в гидрофобное с углом до 106°. Восковая эмульсия также повышает гидрофобность, увеличивая угол смачивания до 92°. Наномодифицированные составы стирол-акриловых дисперсий демонстрируют существенное увеличение блеска до 56 GU и повышенную стойкость к водной среде при сохранении высокой адгезии. Выявлен пластифицирующий эффект добавок, приводящий к снижению твердости покрытия. **Заключение и выводы.** Разработанные составы водных стирол-акриловых дисперсий с кремнийорганическими добавками улучшают технологические свойства, позволяют получать покрытия с повышенной гидрофобностью, водостойкостью и улучшенным декоративным эффектом. Показана возможность целенаправленного регулирования соотношения «гидрофобность – механическая прочность», что открывает перспективы для применения таких составов в условиях повышенной влажности и других атмосферных воздействий.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: водные лакокрасочные материалы, стирол-акриловая дисперсия, кремнийорганические добавки, гидрофобизация, поверхностная энергия, адгезия, полимерные покрытия

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ НАУЧНОЙ РАБОТЫ, РЕЗУЛЬТАТОМ КОТОРОЙ СТАЛА ПУБЛИКАЦИЯ: Исследование выполнено на базе ЗАО «ДЕКАРТ» (Химки, Российская Федерация) за счет собственных средств предприятия в рамках программы по улучшению качества лакокрасочных материалов.

БЛАГОДАРНОСТИ: авторы благодарят руководство ЗАО «ДЕКАРТ» за содействие в организации экспериментальных работ и предоставление лабораторного оборудования и исходного сырья.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Сорокина А.С., Комарова Л.Ю., Копылов Н.И. Наномодификация водных стирол-акриловых лакокрасочных составов кремнийорганическими добавками. *Нанотехнологии в строительстве*. 2026; 18(4):545–554. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2026-18-4-545-554>. – EDN: QRGTFE.

Nanomodification of water-based styrene–acrylic paint and coating compositions with organosilicon additives

Anna S. Sorokina^{1,2*} , Lyudmila Yu. Komarova¹ , Nikita I. Kopylov² 

¹ Moscow Polytechnic University, 107023, Bolshaya Semyonovskaya, 38, Russian Federation

² Dekart CJSC, 141400, Khimki, Leningradskaya str., vl. 31, Russian Federation

* Corresponding author: e-mail: any.sorokina2015@yandex.ru

ABSTRACT

Introduction. Modern trends in the construction and paint industries are aimed at creating environmentally friendly materials with improved protective and decorative properties. Water-based styrene-acrylic dispersions are widely used for painting facades and wooden structures, but their performance characteristics, particularly hydrophobicity, moisture resistance, and adhesion strength, are often subject to increased requirements. A promising method of nanomodification is the introduction of organosilicon compounds for targeted modification of surface properties and interfacial interactions in the polymer matrix. **Materials and methods.** The study was conducted on a styrene-acrylic dispersion using three types of additives: a wetting agent based on polyether-modified polysiloxane, a water-repellent agent in the form of a polysiloxane emulsion, and a wax silicone emulsion. The coating properties were tested using standard methods. **Results and discussion.** It was found that the introduction of a water-repellent ensures a reduction in the surface energy of the coating from 45.9 to 9.6 mN/m. The surface transitions from a hydrophilic state with a contact angle of 54° to a hydrophobic state with an angle of up to 106°. A wax emulsion also enhances hydrophobicity, increasing the contact angle to 92°. Nanomodified styrene-acrylic dispersions exhibit a significant increase in gloss (up to 56 GU) and enhanced resistance to aqueous media while maintaining high adhesion. A plasticizing effect of the additives, leading to a decrease in coating hardness, was revealed. **Conclusion.** The developed formulations, based on aqueous styrene-acrylic dispersions and organosilicon additives, improve their processing properties. They can be used to produce coatings with increased hydrophobicity, water resistance, and improved decorative properties. The ability to specifically control the hydrophobicity-mechanical strength ratio has been demonstrated. This opens up prospects for the use of these compounds in conditions of high humidity and other atmospheric influences.

KEYWORDS: water-based paint and coating compositions, styrene-acrylic dispersion, organosilicon additives, hydrophobization, surface energy, adhesion, polymer coatings

SOURCES OF FUNDING FOR THE SCIENTIFIC WORK RESULTING IN THE PUBLICATION: This work was supported by the DEKART CJSC (Khimki, Russian Federation) own funds as part of a program to improve the quality of paint and coating compositions.

ACKNOWLEDGMENTS: The authors thank the head of DEKART CJSC for assistance in conducting research and providing laboratory equipment and materials.

FOR CITATION:

Sorokina A.S., Komarova L.Yu., Kopylov N.I. Nanomodification of water-based styrene–acrylic paint and coating compositions with organosilicon additives. *Nanotechnologies in Construction*. 2026; 18(4):545–554. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2026-18-4-545-554>. – EDN: QRGTFE.

ВВЕДЕНИЕ

В современном мире строительства и промышленности лакокрасочные материалы выполняют важнейшие функции защиты конструкций от разрушающего воздействия окружающей среды и придания им эстетически привлекательного внешнего вида. Среди всего многообразия лакокрасочных материалов особое место занимают водные дисперсионные составы стирол-акриловых сополимеров. Стирол-акриловые составы сочетают в себе свойства акриловых и стирольных полимеров, способных образовывать гладкие, в меру эластичные и прочные покрытия. Важными аспектами их

свойств являются экологичность, вследствие низкого содержания летучих органических соединений, и пожаробезопасность [1, 2, 16]. Кроме того, водные лакокрасочные составы легко наносятся с помощью распылителя, валика и кисти, не обладают резким запахом, что повышает комфортность процесса окрашивания, быстро сохнут и сокращают необходимость длительного проветривания помещений. Покрытия, которые формируют эти составы, обладают высокой износостойкостью, устойчивостью к химическим веществам, что делает их подходящими для применения на промышленных и коммерческих объектах, а также для наружных строительных работ как по деревянным

конструкциям, так и по пористым минеральным основаниям — бетону и штукатурке [5].

Несмотря на очевидные преимущества, водные стирол-акриловые покрытия обладают рядом ограничений, связанных с недостаточной гидрофобностью, склонностью к загрязнению и ограниченной стойкостью к продолжительному воздействию влаги [3–6, 17, 20]. Эти недостатки приводят к преждевременной деградации покрытий, снижению их защитных и декоративных свойств, что особенно критично для фасадных конструкций, эксплуатируемых в условиях повышенной влажности, перепадов температур и атмосферных загрязнений [7, 18]. В связи с этим актуальной задачей является поиск усовершенствованных способов модификации стирол-акриловых композиций, чтобы они обеспечивали повышенную гидрофобность, адгезионную прочность и эстетичный внешний вид покрытий.

Одним из наиболее перспективных направлений является использование кремнийорганических соединений в качестве наномодифицирующих добавок: силиконов, силоксанов, силанов [8, 9, 19, 21]. Благодаря своей уникальной гибридной структуре, сочетающей органические и неорганические фрагменты, кремнийорганические соединения способны целенаправленно изменять поверхностные свойства покрытий. В ряде литературных источников [10, 11, 22] показано, что введение силиконовых добавок позволяет снизить поверхностную энергию покрытия, придать ему водоотталкивающие свойства, улучшить адгезию и регулировать реологическое поведение лакокрасочных материалов. Наиболее эффективными оказываются комплексные составы, сочетающие несколько типов добавок, что позволяет достичь синергетического эффекта [12].

Несмотря на значительное количество исследований, посвящённых модификации лакокрасочных составов кремнийорганическими соединениями [13–15], пока нет систематизированной информации о совокупном воздействии разнообразных типов добавок на эксплуатационные свойства водных стирол-акриловых дисперсий, применяемых как для наружных, так и для внутренних отделочных работ. Особую актуальность приобретает необходимость определения оптимального баланса между гидрофобными характеристиками, механической устойчивостью и эстетическими качествами финишных покрытий.

Целью данной работы являлось исследование влияния кремнийорганических добавок на гидрофобные, физико-механические и декоративные свойства покрытий на основе водной стирол-акриловой дисперсии и разработка рецептур с улучшенными эксплуатационными характеристиками.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

В качестве объекта исследования использовалась базовая водно-дисперсионная композиция № 1 на основе стирол-акрилового сополимера с содержанием сухого остатка $50 \pm 1\%$, вязкостью по Брукфильду 3860 сПз и минимальной температурой пленкообразования, равной 20°C .

В стирол-акриловый состав вводили следующие добавки:

- гидрофобизатор: водная эмульсия функциональных полисилоксанов;
- смачиватель: полиэфир-модифицированный полисилоксан;
- восковая силиконовая эмульсия: эмульсия воска для дополнительной модификации тактильных и водоотталкивающих свойств.

Во все составы образцов, включая базовый, вводились силиконовый пеногаситель в количестве 0,1%, для подавления пенообразования, и технологические добавки в количестве 3,2%: загуститель, коалесцент, биоцид, буферный агент*.

Экспериментальные образцы готовили путем смешения компонентов в лабораторном диссольтере объемом 1,0 л. Концентрации исследуемых добавок варьировались исходя из массы композиции в каждом варианте: гидрофобизатор — от 1,5 до 5,0% (образцы Г-1, Г-2, Г-3), смачиватель — 0,1–0,5% (образцы С-1, С-2, С-3), восковая силиконовая эмульсия — 1,0–3,0% (образцы В-1, В-2, В-3). В рамках исследования влияния индивидуальных модификаторов на свойства дисперсии были составлены две полимодифицированные композиции. Образец № 2 представлял собой сбалансированное сочетание адгезионной прочности и гидрофобности, а образец № 3 был специально разработан для достижения максимальной гидрофобности. Модифицированные составы стирол-акриловой дисперсии приведены в таблице 1.

Моно- и полимодифицированные составы проходили первичный контроль вязкости на вискозиметре Брукфильда (ГОСТ 25271) и наносились на стеклянные пластины размером 9×12 см аппликатором с толщиной мокрого слоя 120 мкм для визуальной оценки покрытия на наличие каких-либо дефектов. Сушку осуществляли в специализированном климатическом шкафу при температуре $23 \pm 2^\circ\text{C}$ и относительной влажности $50 \pm 5\%$.

Сформированные покрытия оценивали в соответствии со стандартными методиками: определяли блеск под углом 60° (ГОСТ 31975), твердость — по маятниковому прибору (ГОСТ 5233), адгезию к стеклу — методом решетчатого надреза (ГОСТ 31149). Стойкость к статическому воздействию воды оценивали по ГОСТ 9.403. Краевой угол смачивания водой

Таблица 1. Составы моно- и полимодифицированных дисперсий (содержание основных компонентов, масс. %)

Компонент	Образцы											
	№ 1	С-1	С-2	С-3	Г-1	Г-2	Г-3	В-1	В-2	В-3	№ 2	№ 3
Вода дистиллированная	71,7	71,6	71,4	71,2	70,2	68,7	66,7	70,7	69,7	68,7	67,4	64,2
Пеногаситель	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Гидрофобизатор	–	–	–	–	1,5	3,0	5,0	–	–	–	3,0	5,0
Смачиватель	–	0,1	0,3	0,5	–	–	–	–	–	–	0,3	0,5
Восковая эмульсия	–	–	–	–	–	–	–	1,0	2,0	3,0	1,0	2,0
Стирол-акриловая дисперсия	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0
Технологические добавки*	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2
Итого	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

измеряли методом лежащей капли (ГОСТ 7934.2), а поверхностную энергию рассчитывали по методу Оуэнса-Вендта с использованием воды и глицерина в качестве тестовых жидкостей [15].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Сначала были проведены наномодификации стирол-акриловых составов отдельными добавками. Было отмечено, что добавление смачивателя в стирол-акриловую дисперсию приводит к снижению начальной вязкости и значительному улучшению растекания состава. Это обусловлено снижением поверхностного натяжения на границе раздела фаз и формированием более гладкой поверхности пленки. Кроме того, блеск поверхности покрытия увеличился с 14,9 до 35,3 GU (таблица 2). Адгезия на всех образцах была максимальной и составляла 0 баллов.

Наиболее значительное влияние на свойства покрытий оказывает гидрофобизатор (таблица 3). При увеличении его содержания с 1,5% до 5,0% наблюдается рост вязкости до 1,9 раз, по-видимому, это связано с взаимодействием силоксановых цепей с полимерной матрицей и формированием поверхностного мономолекулярного слоя. Данное явление обусловлено миграцией и ориентацией гидрофобных

силоксановых фрагментов на границе раздела «покрытие – воздух», что создает энергетически невыгодный барьер для смачивания водой. Ключевым результатом является кардинальное снижение поверхностной энергии покрытия с 45,9 до 9,6 мН/м и рост краевого угла смачивания с 54° до 106°.

Одновременно с этим явлением наблюдали пластифицирующий эффект, выражающийся в закономерном снижении твердости покрытия по маятниковому прибору с 0,28 до 0,12 отн. ед. и увеличении блеска до 39,0 GU.

Восковая силиконовая добавка увеличила вязкость в 1,4 раза; в то же время, как и гидрофобизатор, она способствовала повышению гидрофобности покрытия, существенно увеличив краевой угол смачивания с 54° до 92° при содержании 3,0% (представлено в таблице 4). Воск привел к росту блеска до 39,3 GU. В полимодифицированных составах данная добавка использовалась для усиления водоотталкивающего эффекта и улучшения тактильных свойств поверхности покрытия.

На основе анализа влияния индивидуальных добавок на свойства стирол-акриловой дисперсии были разработаны полимодифицированные составы: образец № 2 – сбалансированный по адгезии и гидрофобности; образец № 3 – с максимальной

Таблица 2. Свойства стирол-акриловых дисперсий, наномодифицированных смачивателем

Параметр	Образцы			
	№ 1	С-1 (0,1%)	С-2 (0,3%)	С-3 (0,5%)
Вязкость по Брукфильду, сПз	3860	2700	3180	3040
Блеск под углом 60°, GU	14,9	19,0	21,8	35,3
Адгезия к стеклу, балл	0	0	0	0

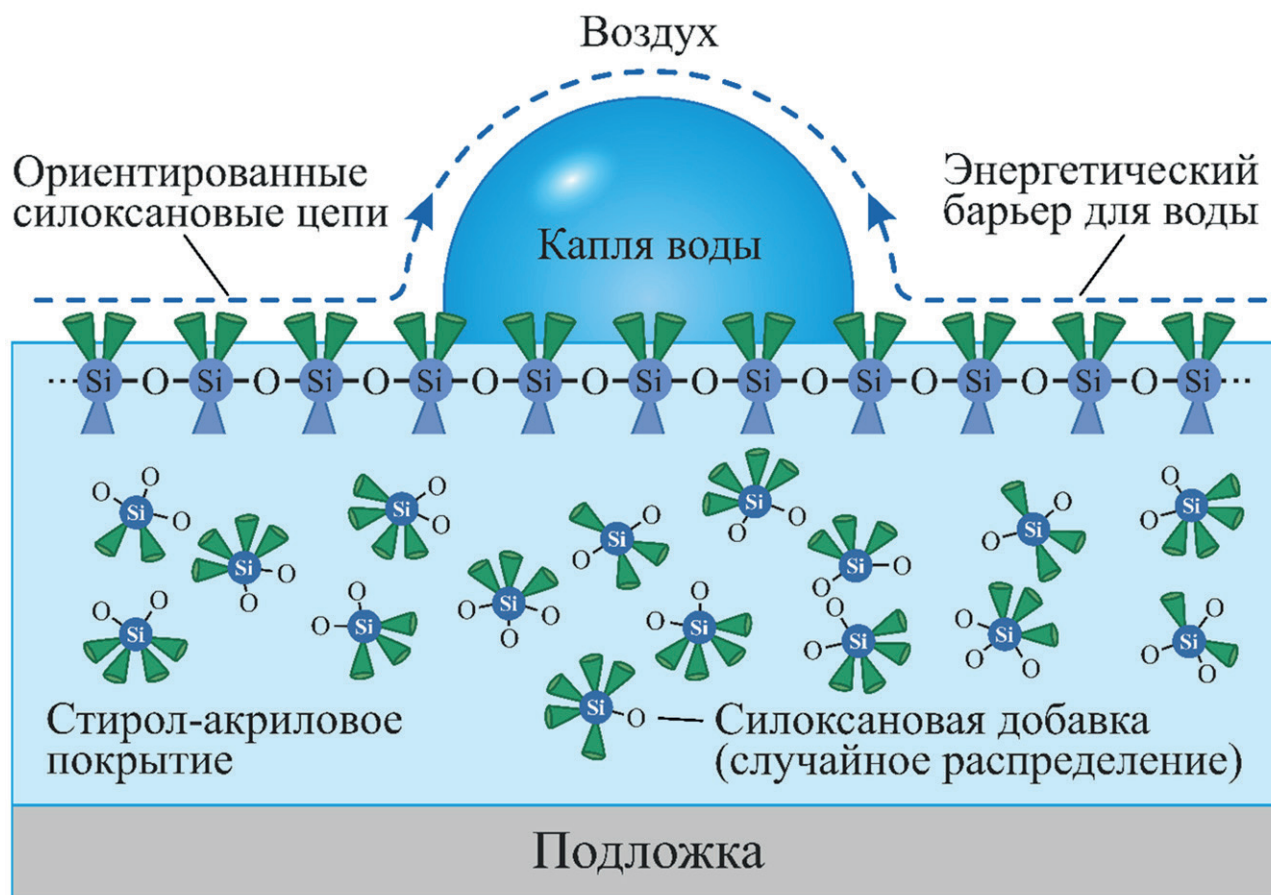


Рис. 1. Схема миграции и ориентации гидрофобных силоксановых фрагментов на границе раздела «покрытие — воздух»

гидрофобностью. Их свойства сравнивались с немодифицированным составом № 1 (таблица 5).

Анализ полученных данных показывает, что наномодифицированные водные стирол-акриловые составы создают покрытия, превосходящие по свойствам базовый состав:

1. Гидрофобность и водостойкость: поверхностная энергия снижается с 45,9 до 21,2 мН/м (образец № 2) и 16,3 мН/м (образец № 3). В отличие от базового покрытия, которое вспучивается и мутнеет после статического воздействия воды из-за частичной диффузии ее в покрытие, модифицированные покрытия не имеют таких изменений, что подтверждает повышенные защитные свойства благодаря гидрофобному барьеру.

2. Физико-механические свойства: твердость покрытий снижается с 0,28 отн. ед. до 0,16 (образец № 2) и 0,10 (образец № 3), что является следствием пластификации полимерной матрицы гидрофобизатором и восковой эмульсией, адсорбирующимися на поверхности полимерной матрицы. При этом

адгезия к стеклу остается практически неизменной, составляет от 0 до 1 балла.

3. Декоративные свойства: блеск покрытий возрастает в 3–4 раза (до 52–56 GU), что связано с улучшенным растеканием композиции и формированием более гладкой полимерной поверхности.

По результатам исследований даны рекомендации для модификации серийных водных лакокрасочных составов по выбору добавок и их содержанию в зависимости от требуемого баланса «гидрофобность — адгезионная прочность — твердость»: для наружных покрытий предпочтительнее состав № 3, для внутреннего назначения — состав № 2.

Результаты исследования сопоставимы с данными в работах [11, 12], где также отмечается положительное влияние силиконовых добавок на гидрофобность покрытий. Однако отличие данной работы заключается в комплексном подходе к наномодификации, обеспечивающем синергетический эффект от сбалансированного введения нескольких добавок.

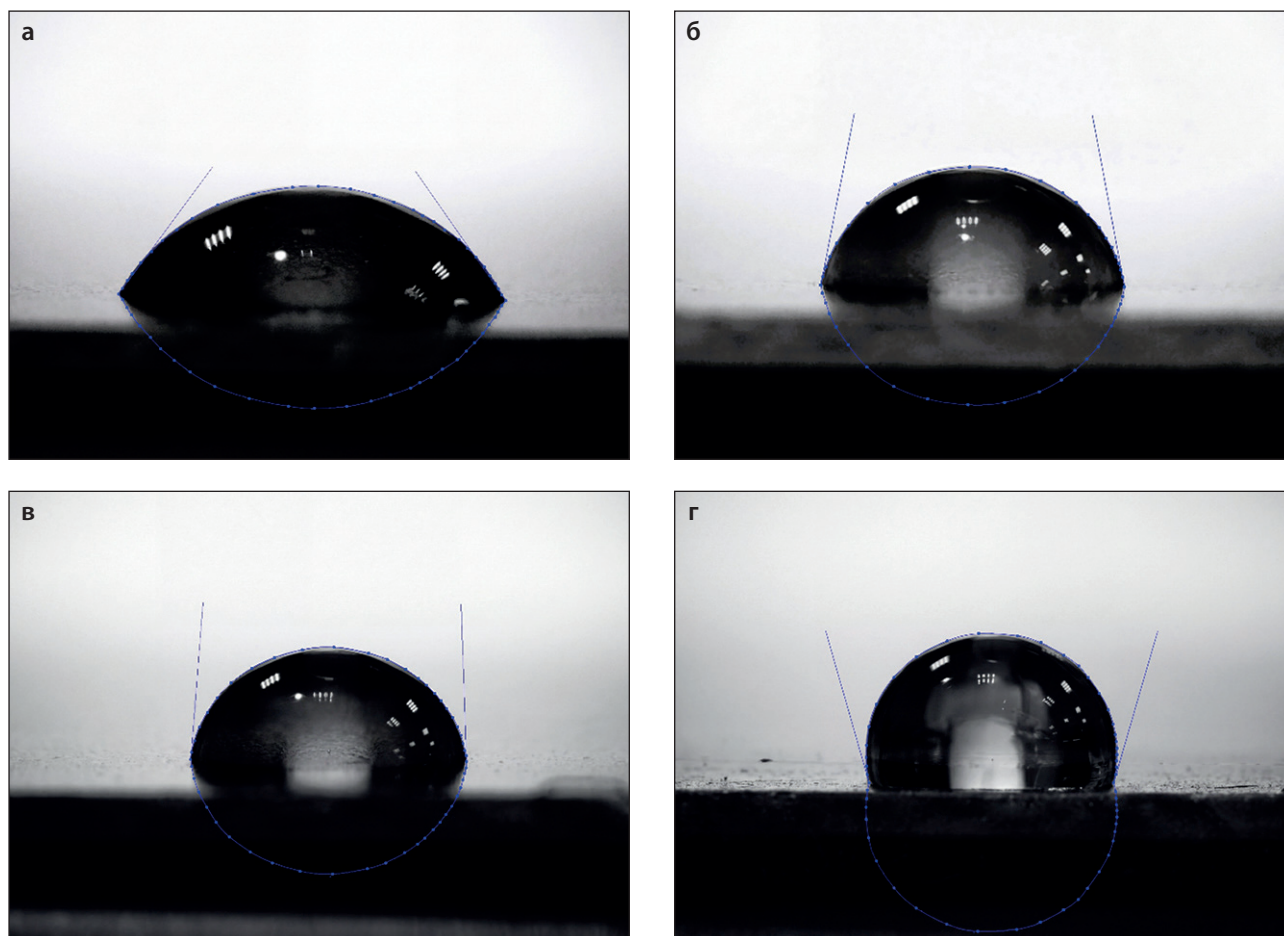


Рис. 2. Фотоснимки капль дистиллированной воды на поверхности образцов с гидрофобизатором, полученные методом лежащей капли: а – № 1; б – Г-1 (1,5%); в – Г-2 (3,0%); д – Г-3 (5,0%)

Таблица 3. Свойства стирол-акриловых дисперсий, наномодифицированных гидрофобизатором

Параметр	Образцы			
	№ 1	Г-1 (1,5%)	Г-2 (3,0%)	Г-3 (5,0%)
Вязкость по Брукфильду, сПз	3860	4100	5840	7780
Блеск под углом 60°, GU	14,9	15,1	18,9	39,0
Адгезия к стеклу, балл	0	0	0	1
Краевой угол смачивания, °	54	79	86	106
Поверхностная энергия, мН/м	45,9	25,8	20,2	9,6
Твердость покрытия, отн. ед.	0,28	0,21	0,15	0,12
Стойкость к статическому воздействию воды	помутнение, вспучивание	помутнение	незначительное помутнение	без изменений

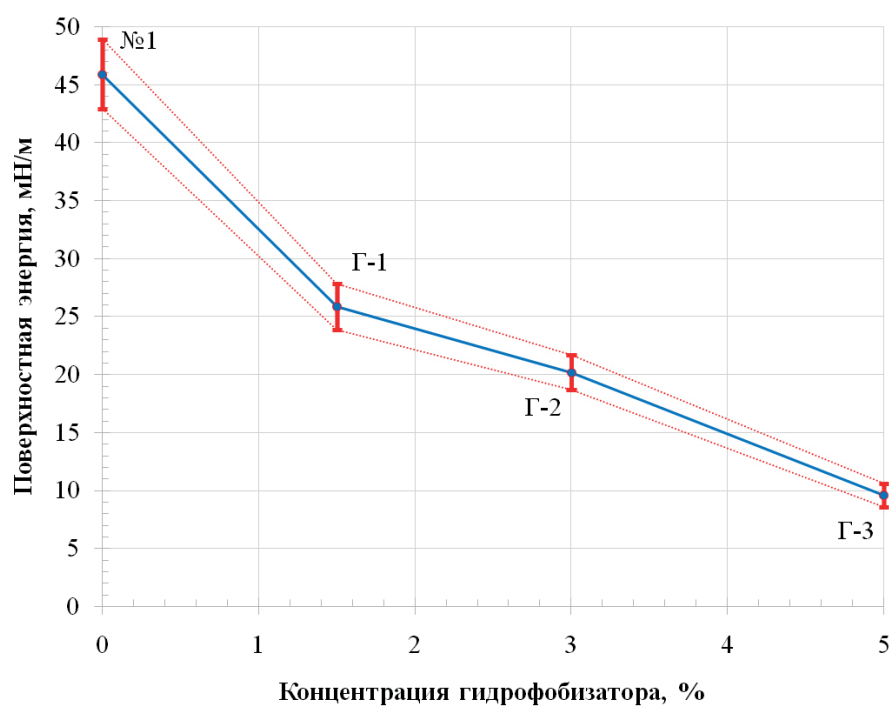


Рис. 3. Влияние концентрации гидрофобизатора на поверхностную энергию покрытия

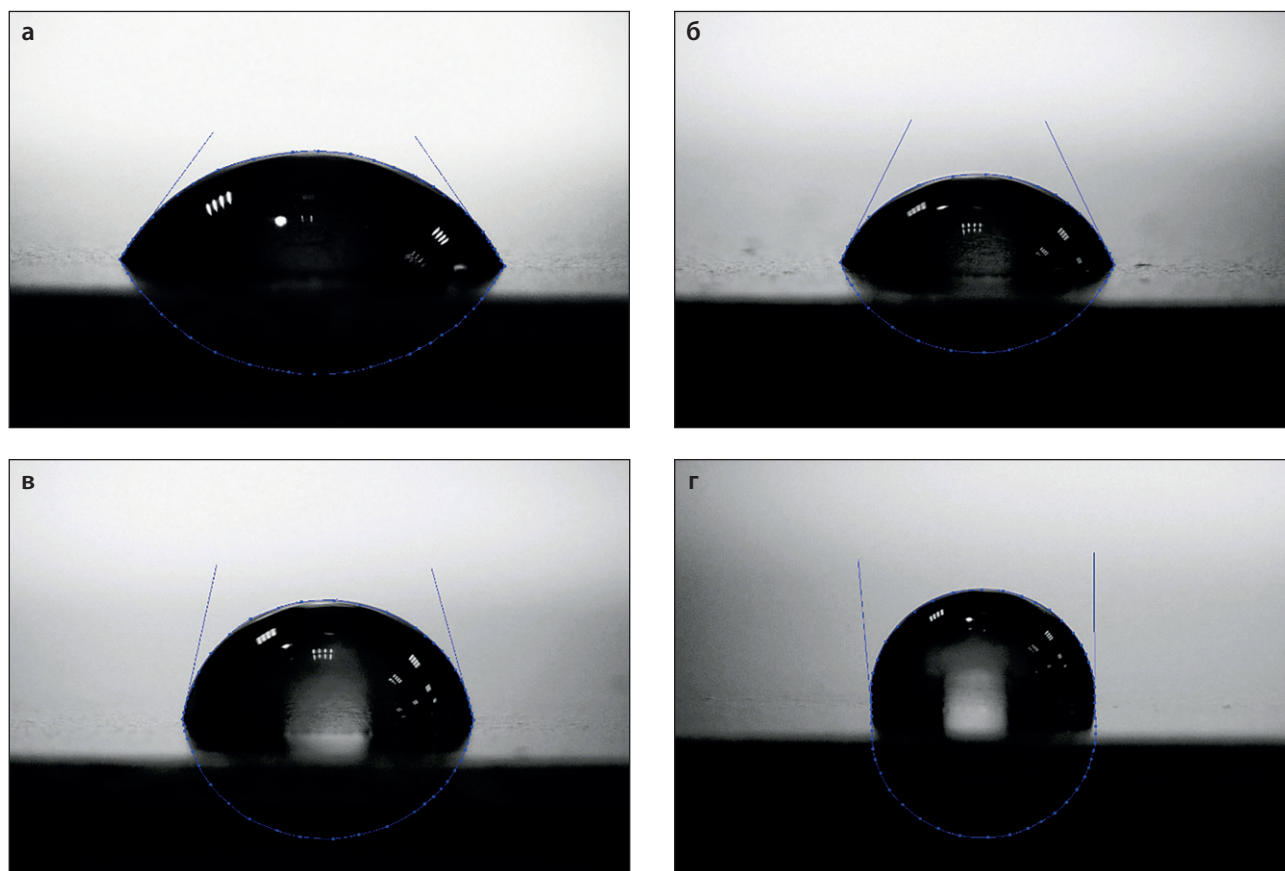
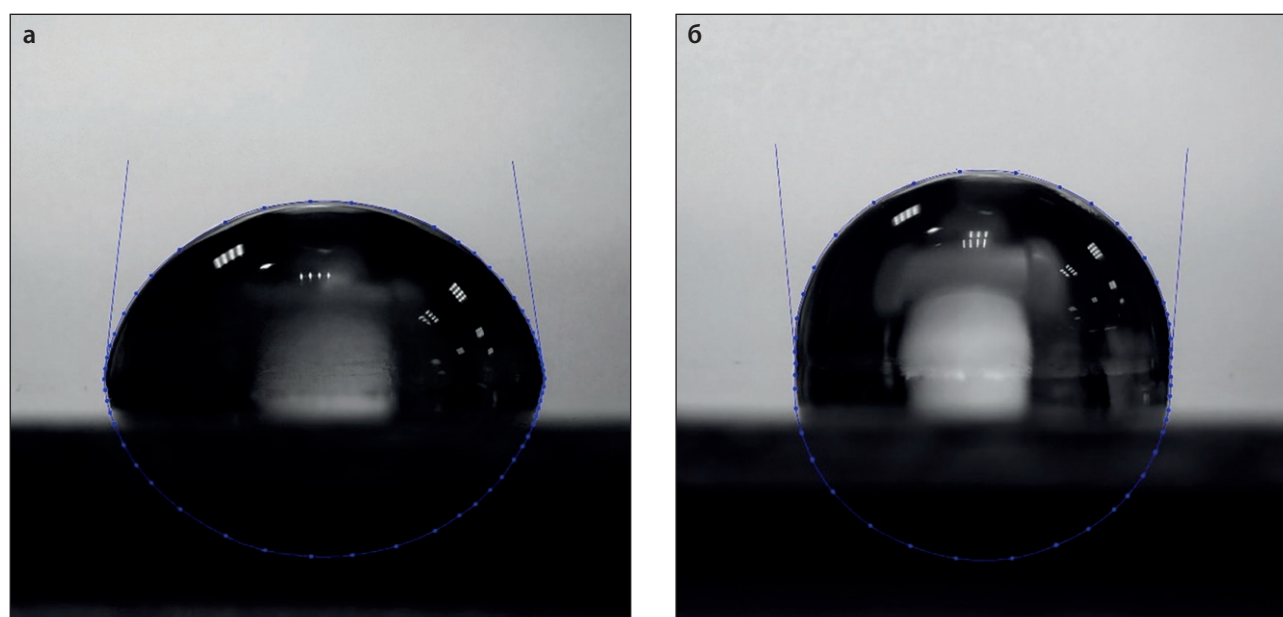


Рис. 4. Фотоснимки каплей дистиллированной воды на поверхности образцов с восковой добавкой, полученные методом лежащей капли: а – № 1; б – В-1 (1,0%); в – В-2 (2,0%); д – В-3 (3,0%)

Таблица 4. Свойства стирол-акриловых дисперсий, наномодифицированных восковой силиконовой эмульсией

Параметр	Образцы			
	№ 1	В-1 (1,0%)	В-2 (2,0%)	В-3 (3,0%)
Вязкость по Брукфильду, сПз	3860	3620	4440	5420
Блеск под углом 60°, GU	14,9	14,6	25,2	39,3
Адгезия к стеклу, балл	0	0	0	0
Краевой угол смачивания, °	54	64	75	92
Поверхностная энергия, мН/м	45,9	31,2	24,5	16,8

**Рис. 5.** Фотоснимки каплей дистиллированной воды на поверхности образцов полимодифицированных составов, полученные методом лежащей капли: а – образец № 2; б – образец № 3**Таблица 5.** Свойства немодифицированного и полимодифицированных составов стирол-акриловых дисперсий

Параметр	Образцы		
	№ 1	№ 2	№ 3
Вязкость по Брукфильду, сПз	3860	4280	4740
Блеск под углом 60°, GU	14,9	52,0	56,0
Адгезия к стеклу, балл	0	0	1
Краевой угол смачивания, °	54	82	92
Поверхностная энергия, мН/м	45,9	21,2	16,3
Твердость покрытия, отн. ед.	0,28	0,16	0,10
Стойкость к статическому воздействию воды	помутнение, вспучивание	без изменений	без изменений

ЗАКЛЮЧЕНИЕ (ВЫВОДЫ)

Проведенные исследования показали высокую эффективность применения кремнийорганических добавок для направленного регулирования свойств водных стирол-акриловых лакокрасочных составов.

Разработанные полимодифицированные составы представляют практический интерес для получения полимерных покрытий, обеспечивающих улучшенные эксплуатационные и декоративные свойства и продлевающих срок их использования в неблагоприятных атмосферных условиях.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Иванов А.И. Современные лакокрасочные материалы: свойства и применение. М.: Химия, 2018. 240 с.
2. Петров В.Г., Сидорова Е.А. Кремнийорганические соединения в лакокрасочной промышленности. СПб.: Профессия, 2019. 180 с.
3. Алексеева Т.В. Стирол-акриловые дисперсии: свойства и применение. М.: Химия, 2017. 210 с.
4. Михайлов С.А. Современные тенденции в производстве водно-дисперсионных красок. СПб.: Лань, 2019. 176 с.
5. Новиков Д.С. Проблемы долговечности лакокрасочных покрытий. М.: Строительство, 2018. 145 с.
6. Козлов П.А. Влияние внешних факторов на свойства лакокрасочных материалов. Казань: КГАСУ, 2020. 132 с.
7. Васильев А.В. Кремнийорганические полимеры: синтез и применение. М.: Наука, 2019. 200 с.
8. Федорова Е.С. Поверхностно-активные вещества в лакокрасочных материалах. М.: Химия, 2018. 192 с.
9. Смирнова Л.П., Волков И.К. Модификация лакокрасочных материалов силиконами. М.: Наука, 2020. 156 с.
10. Толмачев И.А., Петренко Н.А. Водно-дисперсионные краски: краткое руководство для инженеров-технологов. М.: Пейнт-Медиа, 2010. 106 с.
11. Бабкин О.Э., Мыскина Е.Д. Характеристики пленок на основе модифицированных различными способами стиролакриловых дисперсий. *Промышленные покрытия*. 2019;3-4:58-65.
12. Бабкин О.Э., Мыскина Е.Д. Пленки на основе бутадиенстирольного и стиролакрилового латексов, модифицированных метилфенилполисилоксановой смолой. *ЛКМ и их применение*. 2013;9:33-35.
13. Глоба А.И., Богдан Е.О., Балаш А.Ю. Синтез и свойства функционализированных стирол-акриловых дисперсий, стабилизированных бинарными смесями поверхностно-активных веществ. *Полимерные материалы и технологии*. 2023;9(3):63-71. <https://doi.org/10.32864/polymmattech-2023-9-3-63-71> EDN: KPRYAK.
14. Глоба А.И., Егорова А.Л., Прокопчук Н.Р. Влияние состава водных акриловых дисперсий на их технологические и эксплуатационные свойства. *Полимерные материалы и технологии*. 2025;11(4):17-25. <http://doi.org/10.32864/polymmattech-2025-11-4-17-25>
15. Ковалева А.А., Кулевец П.С., Левданский А.Э. Исследование влияния концентрации водных растворов поверхностно-активных веществ на величину краевого угла смачивания пластмасс. *Полимерные материалы и технологии*. 2023;9(3):82-89. <http://doi.org/10.32864/polymmattech-2023-9-3-82-89>
16. Neelambaram A., Shankar K., Sykam D.B., Kumar A., Chakrabarty R., Narayan R. Siloxane-based high solid acrylic latex by mini-emulsion polymerization for coatings with improved water resistance. *Progress in organic coatings*. 2022;171:107011. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2022.107011>
17. Ji S., Gui H., Guan G., Zhou M., Guo Q., Tan M.Y. Molecular design and copolymerization to enhance the anti-corrosion performance of waterborne acrylic coatings. *Progress in organic coatings*. 2021;153:106140. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2021.106140>
18. Qiao Y., et al. Preparation, characterization and flame retardancy of phosphorus-containing polystyrene-acrylate emulsion. *Designed monomers and polymers*. 2019;22:114. <https://doi.org/10.1080/15685551.2019.1616366>
19. Němcová D., Kobetičová K., Tichá P., Burianová I., Koňáková D., Kejzlar P., Böhm M. Balancing hydrophobicity and water-vapor transmission in sol-silicate coatings modified with colloidal SiO₂ and silane additives. *Surfaces*. 2025;8(4):88. <https://doi.org/10.3390/surfaces8040088>
20. Zhao J., Zhou T., Zhang J., Chen H., Yuan C., Zhang W., Zhang A.E.C. Preparation and properties of super hydrophobic films from siloxane-modified two-component waterborne polyurethane and hydrophobic nano SiO₂. *Chemical engineering journal*. 2021;406:127107. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.127107>

21. Yi T., Ma G., Hou C., Li S., Zhang R., Wu J., Hao X. Preparation and properties of poly(siloxane-ether-urethane)-acrylic hybrid emulsions. *Journal of applied polymer science*. 2017;134:44488. <https://doi.org/10.1002/app.44488>

22. Xu G., Deng C., Xing L., Hu J. Preparation and properties of siloxane-modified styrene-acrylate latex particles with core-shell structure. *International journal of polymeric materials*. 2013;62(9):488-492. <https://doi.org/10.1080/00914037.2012.734350>

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Авторы заявляют о том, что при подготовке статьи не использовались технологии генеративного искусственного интеллекта и технологии, основанные на искусственном интеллекте.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Сорокина Анна Сергеевна – магистр кафедры инновационных материалов принтмедиаиндустрии, Московский политехнический университет, 107023, Москва, Большая Семеновская, 38, Российская Федерация; ведущий технолог-исследователь лаборатории разработок, ЗАО «Декарт», Химки, 141400, Химки, Ленинградская, вл. 31, Российская Федерация, any.sorokina2015@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0002-0457-0900>

Комарова Людмила Юрьевна – кандидат технических наук, доцент кафедры инновационных материалов принтмедиаиндустрии, Московский политехнический университет, 107023, Москва, Большая Семеновская, 38, Российская Федерация, luknew@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0003-3005-6411>

Копылов Никита Игоревич – заместитель генерального директора, ЗАО «Декарт», Химки, 141400, Химки, Ленинградская, вл. 31, Российская Федерация, n.kopylov@dekart.ru, <https://orcid.org/0009-0001-8492-6796>

ВКЛАД АВТОРОВ

Сорокина Анна С. – проведение исследования, анализ результатов исследования, написание статьи.

Комарова Людмила Ю. – разработка концепции и методологии исследования, составление итоговых выводов.

Копылов Никита И. – обеспечение материально-технической базы эксперимента, консультации по рецептуростроению, визуализация данных.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 04.05.2026; одобрена после рецензирования 11.08.2026; принята к публикации 17.08.2026.