

Антиобледенительное покрытие на основе силиконовой смолы SILRES® MSE100

Валентина Ивановна Логанина^{1*} , Светлана Николаевна Кислицына¹ , Евгения Владимировна Ткач² , Ирина Васильевна Степина² 

¹ Пензенский государственный архитектурно-строительный университет, Пенза, Россия

² Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Россия

* Автор, ответственный за переписку: e-mail: loganin@mail.ru

АННОТАЦИЯ: Введение. Исследование направлено на получение антиобледенительного покрытия для строительных конструкций путем создания гидрофобного поверхностного слоя, которое регулируется поверхностной энергией и топографией поверхности. **Материалы и методы.** В работе применяли акриловые смолы А-01 и DEGALAN®, высокохлорированную полиэтиленовую смолу НСРЕ и силиконовую смолу SILRES® MSE 100. В качестве наполнителя применяли наночастицы аэросила марки R 972. Антиобледенительные свойства покрытия оценивали по краевому углу смачивания капли воды с покрытием, статическому и динамическому углу смачивания, гистерезису смачивания, адгезии льда к супергидрофобной поверхности. **Результаты и обсуждения.** Выявлено, что покрытия на основе акриловых смол А-01, DEGALAN®, высокохлорированной полиэтиленовой смолы НСРЕ и силиконовой смолы SILRES® MSE100 20%-ной концентрации не обеспечивают супергидрофобных свойств. Супергидрофобный эффект сохранили покрытия на основе силиконовой смолы SILRES® MSE100 5% и 10%-ной концентрации. Сила отрыва капли с покрытия на основе силиконовой смолы SILRES® MSE100 10%-ной концентрации в 3 раза меньше, что обеспечивает более легкое скатывание капли воды с поверхности и ее антиобледенительные свойства. Количество льда на необработанной поверхности составляет 0,59 кг/м², а на поверхности, обработанной составом на основе силиконовой смолы SILRES® MSE100, – 0,15 кг/м². **Выводы.** Разработан состав антиобледенительного покрытия на основе силиконовой смолы SILRES® MSE100. Предлагаемый состав образует покрытие, характеризующееся антиобледенительными свойствами, сохраняющимися в процессе эксплуатации.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: супергидрофобное покрытие, наночастицы аэросила, краевой угол смачивания, антиобледенительные свойства, замораживание, адгезия.

БЛАГОДАРНОСТИ: Исследование выполнено при финансовой поддержке НИУ МГСУ в рамках конкурса 2023 года на проведение фундаментальных и прикладных исследований (НИР/НИОКР) научными коллективами организаций – членов и стратегических партнеров Отраслевого консорциума «Строительство и архитектура» (договор № ПГУАС/К-23) в целях исполнения Программы развития НИУ МГСУ на 2021–2030 годы в рамках реализации Программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030[ПВ1]».

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Логанина В.И., Кислицына С.Н., Ткач Е.В., Степина И.В. Антиобледенительное покрытие на основе силиконовой смолы SILRES® MSE100 // Нанотехнологии в строительстве. 2023. Т. 15, № 3. С. 211–219. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-3-211-219>. – EDN: CYPVCS.

ВВЕДЕНИЕ

Образование сосулек на скатных крышах домов и последующее их падение может приводить к тяжелым и трагическим последствиям. Для защиты строительных конструкций и сооружений находят применение супергидрофобные покрытия. На отечественном рынке представлены различные составы антиобледенительных покрытий [1–3].

Назначение антиобледенительных покрытий заключается в снижении адгезии льда с поверхностью. Такие покрытия существенно уменьшают намораживание и обеспечивают быстрый сход льда при повторяющихся циклах замерзания – оттаивания [4–6].

Несмотря на большое количество предлагаемых составов, проблема борьбы с обледенением остается актуальной. Некоторые антиобледенительные покрытия обладают низким сцеплением со льдом, од-

нако покрытия не сохраняют антиобледенительных свойств в течение длительного срока [7–10].

Адгезионная прочность льда к покрытию является функцией его поверхностной энергии [11,12]. При возрастании разности между значениями поверхностного натяжения $\sigma_{\text{ж}}$ воды и поверхностного натяжения $\sigma_{\text{кр}}$ покрытия растекаемость воды по поверхностному слою покрытия уменьшается, что приводит к сокращению площади контакта между замерзшей водой и покрытием и, как следствие этого, к уменьшению адгезии льда к покрытию [13–15].

У большинства полимерных материалов адгезия со льдом составляет более 0,100 МПа. Практика показывает, что для борьбы с обледенением следует использовать полимеры, термодинамические характеристики которых отвечают следующим требованиям: $\sigma_{\text{кр}} < 25$ мДж/м², контактный угол смачивания водой более 90°. В этом случае адгезионная прочность льда к поверхности не будет превышать 0,030 МПа.

Реальные поверхности имеют шероховатость. При полном смачивании жидкости неровностей поверхности значение угла смачивания θ' определяется уравнением Вензеля:

$$\cos\theta' = r\cos\theta, \quad (1)$$

где r — шероховатость поверхности, которая определяется как отношение истинной и кажущейся площадей поверхности.

При гетерогенном режиме смачивания капля жидкости смачивает не всю поверхность, а лишь вершины рельефа поверхности. Величина угла смачивания определяется уравнением Касси–Бакстера:

$$\cos\theta' = -1 + \Phi_s(\cos\theta + 1), \quad (2)$$

где Φ_s — доля площади поверхности, контактирующая с каплей воды.

Следовательно, супергидрофобные поверхности должны иметь малую долю площади поверхности, контактирующей с поверхностью капли воды. Таким образом, механизм антиобледенительного действия непосредственно связан с гидрофобностью поверхностного слоя, которая регулируется поверхностной энергией и топографией поверхности [16–20].

Перспективным является применение в качестве наполнителя наночастиц гидрофобного аэросила R-972, который имеет поверхностные гидрофобные метильные группы.

Исходя из вышеизложенного, разработка рецептуры антиобледенительного состава заключалась в выборе связующего и наполнителя и их оптимального содержания. При этом исходили из получения топографии поверхности покрытия, обеспечивающей гетерогенный режим смачивания.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В работе применяли акриловые смолы A-01, DEGALAN®, высокохлорированную полиэтиленовую смолу HCPE и силиконовую смолу SILRES® MSE100. В качестве наполнителя применяли аэросил марки R 972 с плотностью $\rho = 2360$ кг/м³, размерами частиц 16 нм и удельной поверхностью $S_{\text{уд}} = 12\,000$ м²/кг.

Степень гидрофобности оценивали по величине краевого угла смачивания (θ°) капли воды с покрытием. Краевой угол смачивания определяли методом проекции капли. Каплю жидкости на горизонтальной исследуемой поверхности проецировали на экран и по рисунку определяли угол θ по высоте (h) капли и радиусу r площади контакта капли с исследуемой поверхностью (r) по формуле:

$$\begin{aligned} \text{при } \theta < 90^\circ \\ \cos\theta &= (r^2 - h^2) / (r^2 + h^2), \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{при } \theta > 90^\circ \\ \cos\theta &= (1-h)/r. \end{aligned} \quad (4)$$

Дополнительно краевой угол смачивания определяли после увлажнения покрытий в течение 72 ч.

Для характеристики антиобледенительных свойств покрытий в работе применяли значение статического и динамического (наступающего и отступающего) краевого угла смачивания, а также гистерезис смачивания, для чего измеряли углы натекания $\theta_{\text{нат}}$ и углы оттеkania $\theta_{\text{от}}$. Динамический краевой угол смачивания определяли методом лежащей капли. Для этого каплю воды помещали на поверхность покрытия с помощью шприца, диаметр капли составлял от 2 до 5 мм. Во время измерения натекающего угла ($\theta_{\text{нат}}$) игла шприца оставалась в капле на протяжении всего опыта. Оттекающий угол ($\theta_{\text{от}}$) измеряли при уменьшении размера капли за счет всасывания воды через шприц (рис. 1). По разнице между натекающим углом и оттекающим углом определялся гистерезис смачивания.

Методика определения критического угла, при котором капля воды с наклонной поверхности начинала скатываться, заключалась в следующем. Капля воды помещалась на металлическую пластину, которая постепенно начинала наклоняться. В качестве подложек использовались металлические пластины профнастила кровельного «MR-20» с полимерным покрытием. Состав антиобледенительного покрытия был нанесен на пластину, после отверждения которого на поверхность наносилась капля воды. Статический краевой угол смачивания определялся методом лежащей капли по формуле (4).

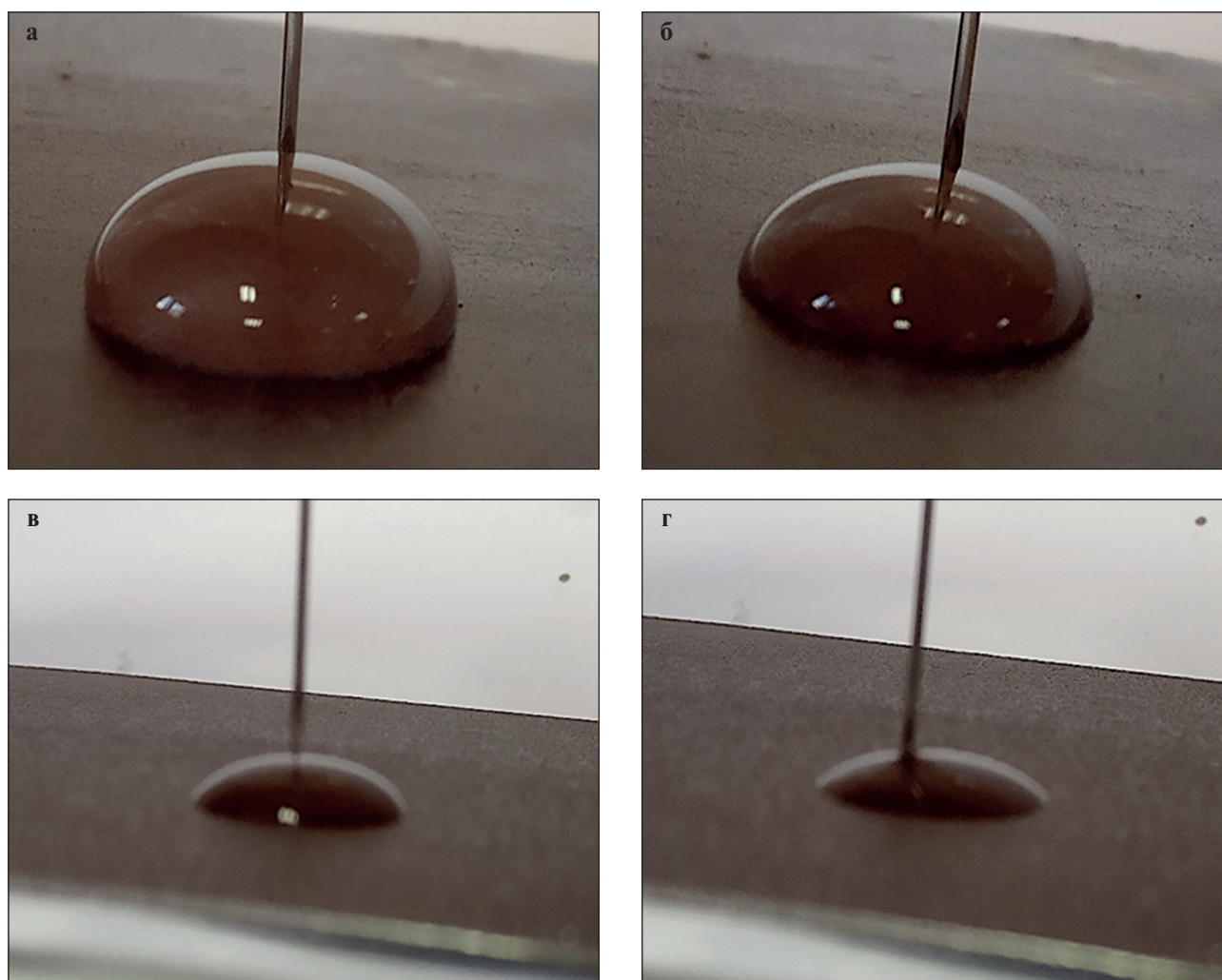


Рис. 1. Фото капли воды на металлической поверхности: а, б – на супергидрофобной поверхности; в, г – на гидрофильной поверхности; а, в – натекание; б, г – оттекание

Условную вязкость раствора полимера определяли с помощью вискозиметра ВЗ-4. Адгезию покрытий к подложке оценивали методом решетчатого надреза в соответствии с ГОСТ 15140-78 «Материалы лакокрасочные. Методы определения адгезии».

Для оценки взаимодействия пленкообразователя и наночастиц аэросила были применяли ИК фурье-спектрометр ФСМ 1201 (ООО «Инфраспек», Россия) с использованием приставки многократного нарушения полного внутреннего отражения МНПВО36 с призмой ZnSe и приставки зеркального отражения ПЗО10. Измерения проводились в спектральном диапазоне 650–3950 см⁻¹ с разрешением 4 см⁻¹. При этом осуществлялась подготовка образцов, заключающаяся в нанесении смолы на подложки из алюминиевой фольги, которая выступала в качестве образца сравнения. Образцы аэросила, представляющие собой ультрадисперсный порошок,

измерялись в рамках метода МНПВО в спектральном диапазоне 650–4250 см⁻¹ с разрешением 4 см⁻¹ – без дополнительной пробоподготовки.

Расчет оптимального содержания наполнителя производился по формуле:

$$\varphi = \frac{\rho_{\text{нас}}}{\rho_{\text{ист}} \left(\frac{n S_{\text{уд}} \rho_{\text{ист}}}{6} + 1 \right)^3}, \quad (5)$$

где $S_{\text{уд}}$ – удельная поверхность наполнителя.

Удельная поверхность наполнителя определялась с помощью прибора ПСХ-12.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 2 представлена зависимость вязкости раствора смол от его концентрации в растворителе (ксилол).

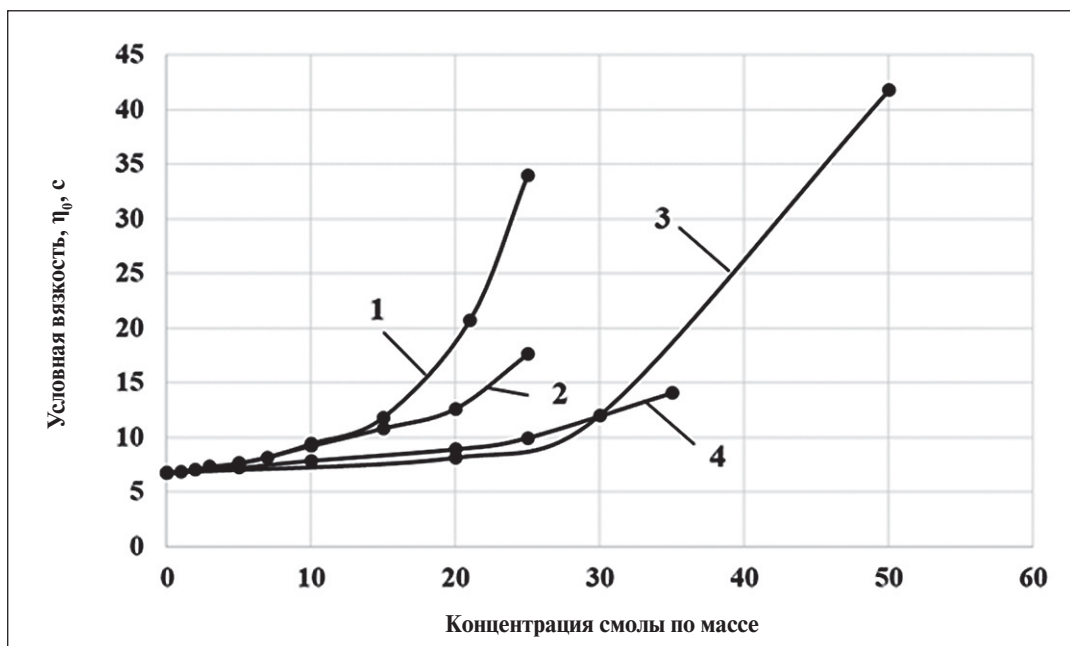


Рис. 2. Зависимость условной вязкости раствора полимера от концентрации смолы:
1 – высокохлорированная полиэтиленовая смола HCPE; 2 – акриловая смола A-01;
3 – силиконовая смола SILRES® MSE 100; 4 – акриловая смола DEGALAN

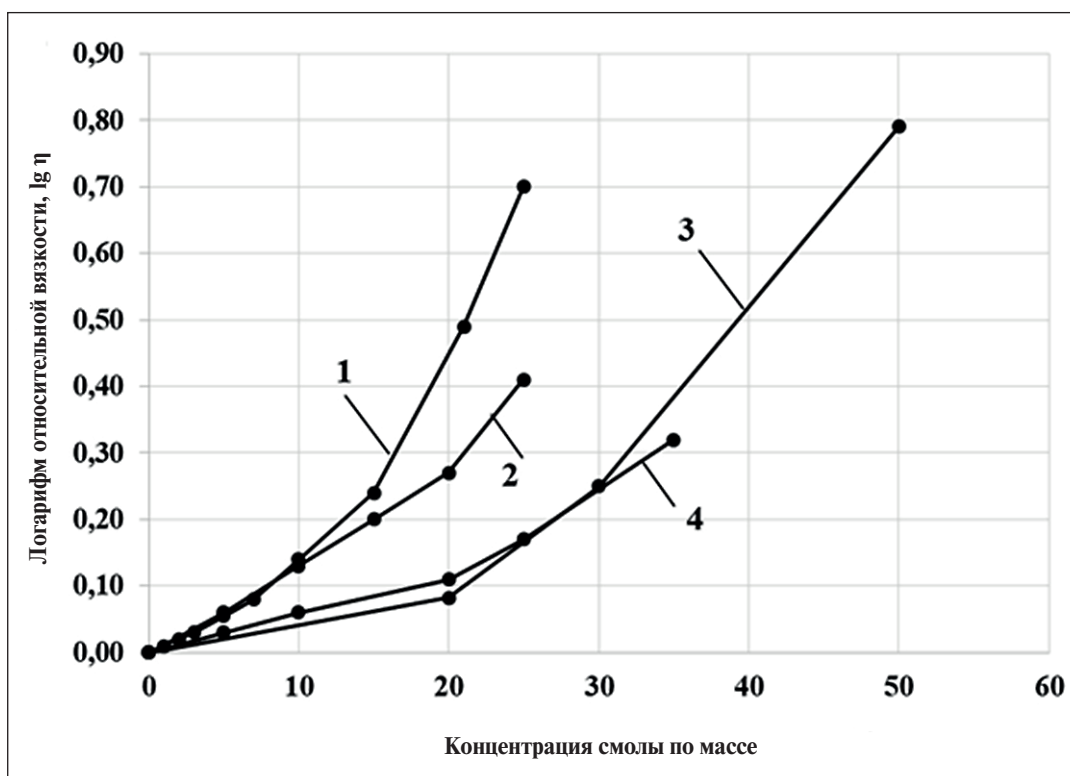


Рис. 3. Зависимость вязкости раствора полимера от концентрации смолы в полулогарифмических координатах: 1 – высокохлорированная полиэтиленовая смола HCPE;
2 – акриловая смола A-01; 3 – силиконовая смола SILRES® MSE 100; 4 – акриловая смола DEGALAN

Представив зависимость вязкости раствора полимера в полулогарифмических координатах (рис. 3), получим две пересекающиеся линии. Точка пересечения, спроецированная на ось абсцисс, будет представлять собой критическую концентрацию полимера в растворе.

Установлено, что критическая концентрация раствора полимера в ксилоле составляет для высокохлорированной полиэтиленовой смолы HCPE 12%, для акриловой смолы А-01, силиконовой смолы SILRES® MSE 100, акриловой смолы DEGALAN – 20% (рис. 3). Для дальнейших исследований принимали концентрацию смол в растворе меньше, чем критическую, так как практически применяемая концентрация полимера в растворе должна быть ниже критической.

Установлено, что оптимальное содержание наночастиц аэросила R 972 для акриловой смолы А-01, высокохлорированной полиэтиленовой смолы HCPE составляет $V = 0,008$, для силиконовой смолы SILRES® MSE 100 – $0,009$, для акриловой смолы DEGALAN – $0,012$.

В табл. 1 представлены значения краевого угла смачивания для различных составов.

Анализ данных, приведенных в табл. 1, свидетельствуют, что покрытия на основе акриловых смол А-01, DEGALAN® и высокохлорированной полиэтиленовой смолы HCPE после увлажнения не обеспечивают супергидрофобных свойств. Краевой угол смачивания менее 150 град и составляет 81–86 град (на металлической подложке) и 104–124 град (на растворной подложке). Покрытия на основе сили-

коновой смолы SILRES® MSE100 20%-ной концентрации, хотя и обладают более высоким краевым углом смачивания, однако также не обладают супергидрофобностью. Краевой угол смачивания на металлической и растворной подложках менее 150 град. Супергидрофобный эффект сохранили покрытия на основе силиконовой смолы SILRES® MSE100 5%-ной и 10%-ной концентрации – краевой угол смачивания на растворной подложке более 150 град. Адгезия покрытий к подложке после увлажнения составляет 1 балл.

На рис. 4 представлены результаты спектроскопических исследований кремнийорганического связующего типа SILRES MSE100 с добавкой аэросила и без нее, а также для сопоставления отдельно приведен ИК-спектр пропускания аэросила.

Анализ представленных ИК-спектров показывает, что порошок аэросила является химически чистым (в рамках разрешения метода) диоксидом кремния, для которого характерно наличие колебательных мод при 810 и 1110 см^{-1} . Первая из мод отвечает скручивающим колебаниям Si_2O , а вторая может быть достоверно отнесена к валентным симметричным и асимметричным колебаниям мостикового кислорода Si–O–Si связей. Введение добавки аэросила в структуру кремнийорганического связующего SILRES MSE 100 не приводит к значительному изменению его качественного состава, о чем можно судить по практически идентичным ИК-спектрам пропускания (рис. 4). При этом новые типы колебаний, отвечающие химическому связыванию SiO_2 и кремнийорганики, не наблюдаются, что, по всей видимости, обусловлено

Таблица 1

Значение краевого угла смачивания на антиобледенительном покрытии на основе различных смол

Вид смолы	Концентрация смолы, %	Объемное содержание наполнителя	Угол смачивания (θ°), град, *	
			на растворной подложке	на металлической подложке
Высокохлорированная полиэтиленовая смола HCPE	15	0,009	<u>150</u> 124	<u>170</u> 86
Акриловая А-01	20	0,008	<u>151</u> 103	<u>175</u> 81
Акриловая смола DEGALAN®	20	0,012	<u>152</u> 110	<u>154</u> 83
Силиконовая смола SILRES® MSE100	20	0,009	<u>152</u> 104	<u>176</u> 104
Силиконовая смола SILRES® MSE100	5	0,009	<u>160</u> 151	—
Силиконовая смола SILRES® MSE100	10	0,004	<u>162</u> 153	—

Примечание. * Над чертой приведены значения краевого угла смачивания до увлажнения, под чертой – после 72 часов увлажнения

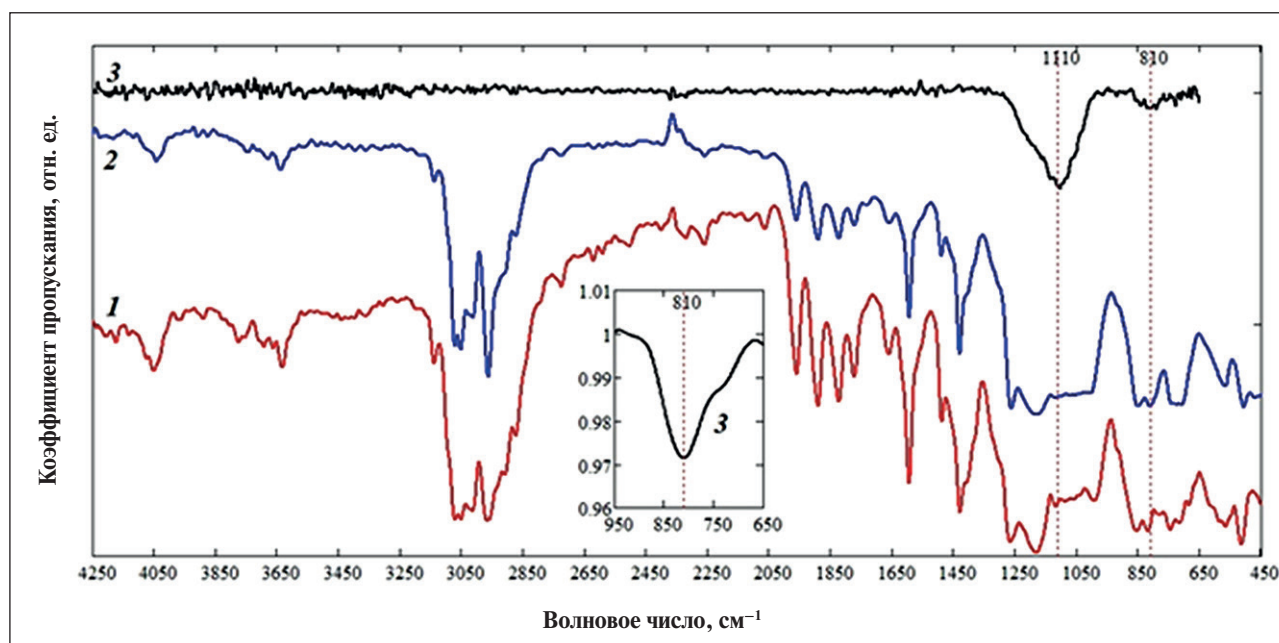


Рис. 4. ИК-спектры пропускания: 1 — кремнийорганического связующего SILRES MSE100; 2 — кремнийорганического связующего с добавкой аэросила; 3 — аэросила

физическим механизмом взаимодействия аэросила и связующего. Однако наблюдаемое на ИК-спектрах уменьшение интенсивности пиков поглощения при 1650 и 3640 см^{-1} , а также в спектральном диапазоне 1750–2000 см^{-1} позволяет сделать вывод о некотором влиянии наночастиц аэросила на процесс конденсации SILRES MSE100, в частности, на удаление из его структуры воды, простых спиртов, а также циклических ангидридов.

Исследовалась зависимость характеристик смачивания в процессе растекания капли на поверхности покрытия на основе предложенного состава. Значения краевых углов представлены в табл. 2 и явно подтверждают наличие гистерезиса на поверхности.

При угле наклона металлической пластины 10° капля воды с покрытия на основе силиконовой смолы SILRES® MSE100 начинает скатываться (рис. 5).

Дополнительно был проведен расчет силы, при которой капля воды скатывается с наклонной поверхности. Объем капли воды составлял 0,05 мл

и был одинаковым для различных поверхностей. В этом случае ее масса определялась в соответствии с формулой

$$m = V\rho, \quad (6)$$

где ρ — плотность воды.

Скатывание происходит, когда отрывается задний край капли. Условие отрыва капли определяется выражением

$$F = mgs\sin\alpha, \quad (7)$$

где m — масса капли воды, кг;

α — угол скатывания, град;

F — усилие отрыва, н.

Усилие F является суммой величин адгезии капли воды и силы трения.

В табл. 3 приведены значения силы F для гидрофильной и супергидрофобной поверхности.

Таблица 2

Краевой угол для воды на поверхности

Тип поверхности	Статический угол смачивания	Угол оттекания, град	Угол натекания, град	Гистерезис смачивания
покрытие на основе силиконовой смолы SILRES® MSE100	164	162,8	166,5	3,7
гидрофильная	25,4	21,1	45	23,9



Рис. 5. Фото капли воды на поверхности антиобледенительного покрытия на металлической поверхности: а — в исходном состоянии; б — через 1 сек скатывания; в — через 2 сек скатывания

Таблица 3

Угол скатывания капли воды с поверхности

Тип поверхности	Угол скатывания, град	Сила отрыва, н
пластины профнастила кровельного «MR-20» (гидрофильная поверхность)	31	$2,55 \cdot 10^{-4}$
пластины профнастила кровельного «MR-20» обработаны составом на основе силиконовой смолы SILRES® MSE100	10	$0,85 \cdot 10^{-4}$

Выявлено уменьшение в 3 раза силы отрыва капли с антиобледенительного покрытия, что обеспечивает более легкое скатывание капли воды с поверхности.

Установлено, что удаление льда с супергидрофобной поверхности при комнатной температуре при угле наклона пластины 90 град начинается через 1 минуту 55 сек, а через 3 минуты лед падает

с пластины (рис. 6). Удаление льда с гидрофильной поверхности не наблюдается, через 6 минут нахождения при комнатной температуре лед растаивает (рис. 7).

Выявлено, что количество льда на гидрофильной поверхности составляет $0,59 \text{ кг/м}^2$, а на поверхности, обработанной составом на основе силиконовой смолы SILRES® MSE100, — $0,15 \text{ кг/м}^2$.

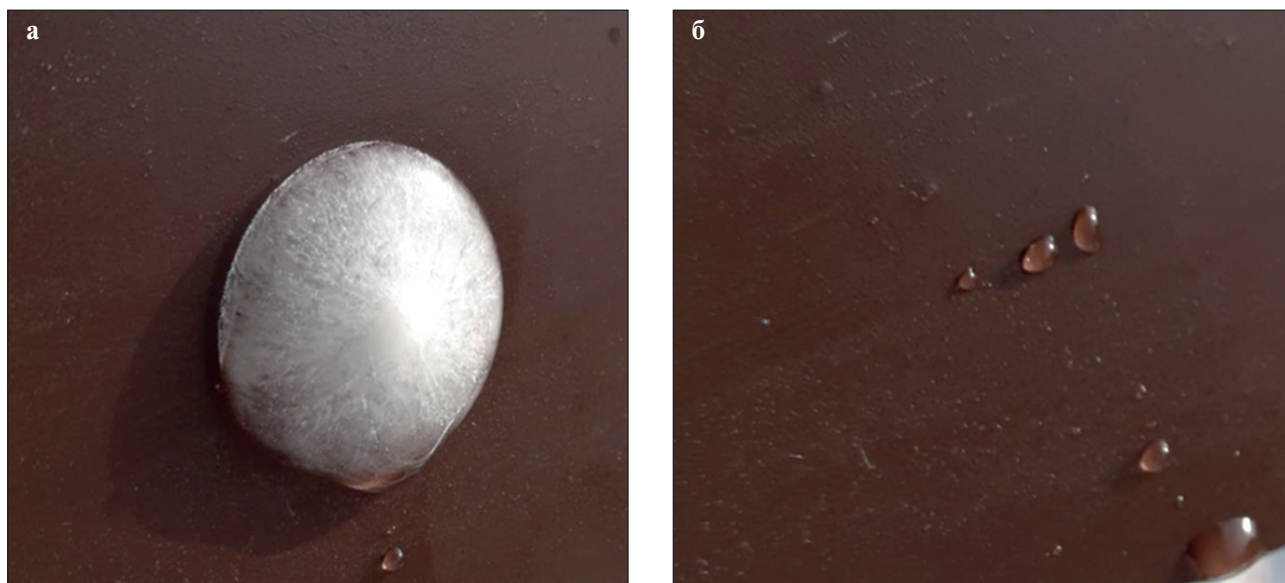


Рис. 6. Фото изображения скатывания льда с поверхности, обработанной составом на основе силиконовой смолы SILRES® MSE100: а — начало скатывания льда; б — после скатывания

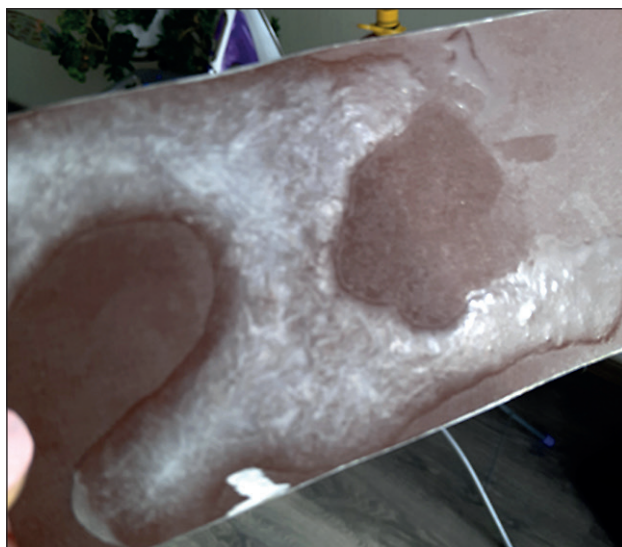


Рис. 7. Фото изображения скатывания льда с гидрофильной поверхности (температура замораживания –10°C)

ВЫВОДЫ

Разработан состав антиобледенительного покрытия на основе силиконовой смолы SILRES® MSE100 5%-ной и 10%-ной концентрации и наночастиц аэросила марки R 972. Состав предназначен для защиты строительных конструкций от обледенения. Результаты проведенных исследований свидетельствуют, что предлагаемый состав образует покрытие, характеризующееся антиобледенительными свойствами, сохраняющимися в процессе эксплуатации.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Шевченко В.Я., Шилова О.А., Кочина Т.А., Баранова Л.Д., Белый О.В. Ресурсосбережение и безопасность на транспорте за счет внедрения экологически безопасных защитных покрытий. *Физика и химия стекла*. 2019. 45(1). 3–15. <https://doi.org/10.1134/S0132665119010074>
2. Соловьянич Л.В., Кондрашов С.В., Нагорная В.С., Мельников А.А. Особенности получения антиобледенительных покрытий. *Труды ВИАМ*. 2018. 6. 77–98. <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2018-0-6-77-98>
3. Liu J., Wang J., Mazzola L., Memon H., Barman T., Turnbull B. Development and evaluation of poly(dimethylsiloxane) based composite coatings for icephobic applications. *Surface and coatings technology*. 2018; 349: 980–985. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.06.066>
4. Rongxian Qiu, Zhongxin Li, Zhilin Wu. Enhanced anti-icing and anti-corrosion properties of wear-resistant superhydrophobic surfaces based on Al alloys. *Materials research express*. 2019; 6(4): article 045059. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/aatdfl>
5. Бойнович Л.Б. Супергидрофобные покрытия – новый класс полифункциональных материалов. *Вестник Российской АН*. 2013. 8(1). 10–22. <https://doi.org/10.7868/S0869587313010039>
6. Kreder M.J., Alvarenga J., Kim P., Aizenberg J. Design of anti-icing surfaces: smooth, textured or slippery? *Nature Reviews Materials*. 2016;1(1): 15003. <https://doi.org/10.1038/natrevmats.2015.3>
7. Бойнович Л.Б., Емельяненко А.М. Гидрофобные материалы и покрытия: принципы создания, свойства и применение. *Успехи химии*. 2008. 77. 619–638. <https://doi.org/10.1070/RC2008v077n07ABEH003775>
8. Rajiv S., Kumaran S., Sathish, M. Long-term-durable anti-icing superhydrophobic composite coatings. *Journal of applied polymer science*. 2018;136(7): 47059. <https://doi.org/10.1002/app.47059>
9. Zheng Shunli, Bellido-Aguilar, Daniel Angel; Wu Xinghua. Durable Waterborne Hydrophobic Bio-Epoxy Coating with Improved Anti-Icing and Self-cleaning performance. *Acs sustainable chemistry & engineering*. 2019; 7(1): 641–649. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.8b04203>
10. Rongxian Qiu, Zhongxin Li, Zhilin Wu. Enhanced anti-icing and anti-corrosion properties of wear-resistant superhydrophobic surfaces based on Al alloys. *Materials research express*. 2019; 6(4): article 045059. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/aatdfl>
11. Piscitelli F., Tescione F., Mazzola L. On a simplified method to produce hydrophobic coatings for aeronautical applications. *Applied surface science*. 2019; 472(SI): 71–81. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.04.062>
12. Xinghua Wu, Silberschmidt Vadim V., Zhong-Ting Hu. When superhydrophobic coatings are icephobic: Role of surface topology. *Surface & Coatings technology*. 2019; 358: 207–214. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.11.039>
13. Boinovich L.B., Emelianenko A.M. Hydrophobic materials and coatings: principles of creation, properties and application. *Chemistry Advances*. 2008; 77(7): 619–638. <https://doi.org/10.1070/RC2008v077n07ABEH003775>

14. Логанина В.И. Исследование кинетики замерзания капли воды на супергидрофобной поверхности покрытий. *Вестник МГСУ*. 2019. 14(4). 311–317. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2019.4.435-441>
15. Логанина В.И., Кислицына С.Н., Сергеева К.А. Сравнительная оценки адгезии льда к супергидрофобным и гидрофильным покрытиям. *Известия вузов. Строительство*. 2019. 4. 28–34.
16. Zhang H.Y., Yang Y.L., Pan J.F. Compare study between icephobicity and superhydrophobicity. *Physica b-condensed matter*. 2019;556: 118–130. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2018.12.014>
17. Nosonovsky M., Bhushan B. Superhydrophobic Surfaces and Emerging Ap-plications: Nonadhesion, Energy, Green Engineering. *Current opinions coll. interface sci*. 2009; 14: 270–280. <https://doi.org/10.1016/j.cocis.2009.05.004>
18. Venkateswara Rao A., Latthe S.S., Nadargi D.Y., Hirashima H., Ganesan V. Preparation of MTMS based transparent superhydrophobic silica films by sol-gel method. *J. colloid interf. Sci*. 2009; 332(2): 484–490. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2009.01.012>
19. Шилова О.А., Проскурина О.И., Антипов В.Н., Хамова Т.В., Есипова Н.Е., Пугачев К.Э., Ладили-на Е.Ю., Кручинина И.Ю. Золь-гель синтез и гидрофобные свойства антифрикционных покрытий для использования в высокооборотных минитурбогенераторах. *Физика и химия стекла*. 2014. 40(3). 419–425.
20. Shen Yizhou, Wu Yu, Tao Jie. Spraying Fabrication of Durable and Transparent Coatings for Anti Icing Ap-plication: Dynamic Water Repellency, Icing Delay, and Ice Adhesion. *Acs applied materials & interfaces*. 2019; 1: 3590–3598. <https://doi.org/10.1021/acsami.8b19225>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Логанина Валентина Ивановна – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Управление качеством и технологии строительного производства» Пензенского государственного университета архитектуры и строительства, Пенза, Россия, loganin@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7532-0074>

Кислицына Светлана Николаевна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология строительных материалов и деревообработки» Пензенского государственного университета архитектуры и строительства, Пенза, Россия, kislitsyna_sn@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5177-2890>

Ткач Евгения Владимировна – доктор технических наук, профессор кафедры «Строительное материаловедение» Национального исследовательского Московского государственного строительного университета, Москва, Россия, <https://orcid.org/0000-0003-2132-4971>

Степина Ирина Васильевна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительное материаловедение» Национального исследовательского Московского государственного строительного университета, Москва, Россия, <https://orcid.org/0000-0002-5358-2935>

ВКЛАД АВТОРОВ

Логанина В.И. – научное руководство, подготовка образцов, определение удельной поверхности, сбор, анализ и обработка результатов, написание статьи.

Кислицына С.Н. – оценка краевого угла смачивания, гистерезис смачивания.

Ткач Е.В. – расчет силы скатывания капли воды.

Степина И.В. – обзор литературы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 07.04.2023; одобрена после рецензирования 05.05.2023; принята к публикации 06.06.2023.