

ЗАЩИТА ЗДАНИЙ, СООРУЖЕНИЙ И КОНСТРУКЦИЙ PROTECTION OF BUILDINGS AND STRUCTURES

DOI 10.22363/1815-5235-2023-19-5-520-533

УДК 699.88

EDN: IEBVCE

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH ARTICLE

Влияние гидрофобизации аэродромных покрытий на расход противогололедных реагентов

А.А. Аверкиев¹ , И.Е. Васенин² , М.Н. Ефименко³  , Ф.А. Пашенко³ , Н.С. Харьков³ 

¹ Федеральное агентство воздушного транспорта, Москва, Российская Федерация

² Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии, Москва, Российская Федерация

³ Проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт воздушного транспорта «Ленаэропроект», Санкт-Петербург, Российская Федерация

✉ E-mail: vshuk1@mail.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 7 июля 2023 г.

Доработана: 23 сентября 2023 г.

Принята к публикации: 27 сентября 2023 г.

Заявление о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов

Нераздельное соавторство.

Аннотация. Вопрос снижения затрат на эксплуатационное содержание аэродромных покрытий сегодня стоит особенно остро в связи с увеличением интенсивности внутренних авиаперевозок. Значительная часть затрат на эксплуатационное содержание аэродромов расходуется на приобретение противогололедных реагентов (ПГР), используемых для защиты аэродромных покрытий от обледенения. За счет применения гидрофобизирующих пропиток (ГФП) для цементобетонных аэродромных покрытий существует возможность сокращения объемов затрачиваемых ПГР. Предположение о возможном сокращении расходов на приобретение ПГР за счет применения ГФП подтверждено лабораторными испытаниями над образцами цементобетонных плит. В ходе лабораторных испытаний моделировался процесс обледенения аэродромных покрытий и удаления льдообразований. По результатам экспериментальных исследований определено, что расход ПГР на образцах цементобетонных плит, обработанных ГФП, снижается на 35 % по сравнению с аналогичными образцами, не обработанными ГФП. Для экономической оценки сокращения расходов на приобретение ПГР проанализированы расходы применяемых ПГР на гражданских аэродромах Российской Федерации.

Аверкиев Александр Андреевич, начальник управления аэропортовой деятельности, Федеральное агентство воздушного транспорта, Москва, Российская Федерация; ORCID: 0009-0009-8475-2608; E-mail: xemona@bk.ru

Васенин Игорь Евгеньевич, аспирант, Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии, Москва, Российская Федерация; ORCID: 0009-0003-8458-2553; E-mail: m_vasenina@mail.ru

Ефименко Михаил Николаевич, кандидат военных наук, Руководитель испытательного центра, Проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт воздушного транспорта «Ленаэропроект», Санкт-Петербург, Российская Федерация; ORCID: 0009-0009-9864-8780; E-mail: vshuk1@mail.ru

Пашенко Федор Александрович, кандидат технических наук, генеральный директор, Проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт воздушного транспорта «Ленаэропроект», Санкт-Петербург, Российская Федерация; ORCID: 0009-0001-2947-5291; E-mail: fedor.p@my.com

Харьков Никита Сергеевич, кандидат технических наук, заместитель генерального директора по науке, Проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт воздушного транспорта «Ленаэропроект», Санкт-Петербург, Российская Федерация; ORCID: 0000-0001-7175-0296; E-mail: nkharikov@mail.ru

© Аверкиев А.А., Васенин И.Е., Ефименко М.Н., Пашенко Ф.А., Харьков Н.С., 2023

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

ской Федерации с учетом их принадлежности к различным климатическим зонам. Проведенная оценка показала, что экономия затрат на приобретение ПГР может достигать 29,1%.

Ключевые слова: цементобетонные аэродромные покрытия, кремнийорганические соединения, водопоглощение цементобетона, водопроницаемость цементобетона, морозостойкость цементобетона, долговечность цементобетона

Для цитирования

Аверкиев А.А., Васенин И.Е., Ефименко М.Н., Пащенко Ф.А., Харьков Н.С. Влияние гидрофобизации аэродромных покрытий на расход противогололедных реагентов // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2023. Т. 19. № 5. С. 520–533. <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2023-19-5-520-533>

Effect of hydrophobization of airfield coatings on the consumption of deicing reagents

Alexander A. Averkiev¹ , Igor E. Vasenin² , Mikhail N. Efimenko³  ,
Fedor A. Pashchenko³ , Nikita S. Kharkov³ 

¹ Federal Agency for Air Transport, Moscow, Russian Federation

² Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography, Moscow, Russian Federation

³ Design and Research Institute of Air Transport “Lenaeroproject”, Saint Petersburg, Russian Federation

 E-mail: vshukl@mail.ru

Article history

Received: July 7, 2023

Revised: September 23, 2023

Accepted: September 27, 2023

Conflicts of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Authors' contribution

Undivided co-authorship.

Abstract. The issue of reducing costs for the maintenance of airfield coatings is particularly important nowadays due to the increase in the intensity of domestic air transportation. A significant part of the costs of the operational maintenance of airfields is spent on the purchase of deicing reagents (DIR) used to protect airfield pavements from icing. There is a possibility to reduce the required amount DIR by using of hydrophobizing impregnations (HPI) for cement concrete airfield pavements. The assumption about possibility to reduce costs for DIR by using HPI was proven by laboratory tests on specimens of cement concrete slabs. In the course of laboratory tests the process of airfield pavement icing and de-icing was modeled. According to the results of experimental studies it was determined that the consumption of DIR for cement concrete slabs specimens treated with HPI was reduced by 35% compared to similar specimens without HPI treatment. For the economic evaluation of cost reduction for the purchase of DIRs, the costs of applied DIRs used at civil airfields of the Russian Federation were analyzed, taking into account their location in different climatic zones. The assessment has revealed that the cost savings for the purchase of DIRs can be up to 29.1 %.

Keywords: cement concrete airfield coatings, silicon-organic compounds, water absorption of cement concrete, water permeability of cement concrete, frost resistance of cement concrete, durability of cement concrete

For citation

Averkiev A.A., Vasenin I.E., Efimenko M.N., Pashchenko F.A., Kharkov N.S. Effect of hydrophobization of airfield coatings on the consumption of deicing reagents. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2023;19(5):520–533. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2023-19-5-520-533>

Alexander A. Averkiev, Head of the Airport Operations Department, Federal Air Transport Agency, Moscow, Russian Federation; ORCID: 0009-0009-8475-2608; E-mail: xemona@bk.ru

Igor E. Vasenin, postgraduate student, Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography, Moscow, Russian Federation; ORCID: 0009-0003-8458-2553; E-mail: m_vasenina@mail.ru

Mikhail N. Efimenko, Ph.D., Head of the Test Center, Design and Research Institute of Air Transport “Lenaeroproject”, St. Petersburg, Russian Federation; ORCID: 0009-0009-9864-8780; E-mail: vshukl@mail.ru

Fedor A. Pashchenko, Ph.D., General Director, Design and Research Institute of Air Transport “Lenaeroproject”, St. Petersburg, Russian Federation; ORCID: 0009-0001-2947-5291; E-mail: fedor.p@my.com

Nikita S. Kharkov, Ph.D., Deputy General Director for Science, Design and Research Institute of Air Transport “Lenaeroproject”, St. Petersburg, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-7175-0296; E-mail: nkarkov@mail.ru

1. Введение

Применение гидрофобизирующих пропиток (далее — ГФП) на аэродромных покрытиях способствует повышению их стойкости к воздействию внешних климатических факторов за счет улучшения физико-механических характеристик последних, таких как: водопоглощение, водопроницаемость и морозостойкость [1–3]. Улучшение данных характеристики, в конечном итоге, приводит к возрастанию долговечности аэродромных покрытий [4–6].

Снижение затрат на эксплуатационное содержание аэродромов на сегодняшний день особенно актуально по причине активно растущей интенсивности полетов воздушных судов, а значит и интенсивности использования аэродромных покрытий [7–9].

Вопрос повышения долговечности цементобетонных покрытий аэродромов наиболее важен в связи с тем, что последние, в отличие от бетонных конструкций эксплуатируемых в других отраслях, подвержены воздействию значительно большего числа негативных факторов: интенсивное воздействие ультрафиолетового облучения, увлажнение за счет атмосферной влаги и грунтовых вод с последующим высушиванием; воздействие агрессивных сред в виде противогололедных реагентов (далее — ПГР), противообледенительных жидкостей, проливов топлива и машинного масла, растворов моющих средств, используемых при удалении отложений резины на участках торможения воздушных судов; замораживанию-оттаиванию в зимний период; воздействию горячих реактивных струй от работы двигателей воздушных судов [10–12].

За основной объект исследования данной работы принято комплексное взаимодействие гидрофобизирующей пропитки и противогололедных реагентов в гранулированном и жидком виде на процесс образования льда и его удаление.

Основная цель исследования — проверка возможности сокращения расхода противогололедных реагентов при их применении на цементобетонных покрытиях, обработанных гидрофобизирующими пропитками в сравнении с аналогичными покрытиями, но не обработанными гидрофобизирующими пропитками при реализации процесса удаления льдообразований.

Для достижения цели поставлены следующие задачи:

- анализ существующих методов повышения эксплуатационных свойств бетонных покрытий аэродромов за счет обработки последних ГФП и выбор наиболее эффективных из них;
- проведение серии экспериментов по удалению льдообразований с поверхности цементобетонных покрытий обработанных и необработанных ГФП при варьируемом количестве ПГР и оценка полученных результатов;
- исследование достигаемого экономического эффекта за счет возможного снижения ПГР на цементобетонных покрытиях аэродромов, обработанных ГФП.

В современных условиях содержания аэродромных покрытий накоплен богатый опыт повышения их защитных свойств за счет применения различных типов ГФП. В качестве основных ГФП обычно используют кремнийорганические соединения (далее — КОС) двух классов:

- растворимые в воде силиконаты, используемые в виде водных растворов [13];
- нерастворимые в воде силоксаны, силаны, силиконы, используемые в виде водных эмульсий или растворов на органическом растворителе [14–16].

Многолетний опыт проверки ГФП на основе КОС различных производителей, накопленный в АО «ПииНИИ ВТ «Ленаэропроект», доказывает тезис о том, что обработка поверхности цементобетонных покрытий аэродромов КОС повышает их эксплуатационные свойства.

В табл. 1 в качестве примера показано, какие изменения происходят с цементобетонным покрытием после его обработки ГФП на основе КОС. Из анализа результатов сравнительных испытаний цементобетонных образцов, обработанных ГФП на основе КОС, с образцами, не подвергавшимися обработке, следует, что гидрофобизационная обработка цементобетона приводит к существенному улучшению его физико-механических свойств.

Основные показатели, характеризующие степень повышения физико-механических свойств цементобетонных покрытий: морозостойкость, водопоглощение, водонепроницаемость, глубина проникновения ГФП внутрь цементобетонного покрытия. И так как гидрофобизирующие материалы на основе КОС не являются пленкообразующими, такой важный показатель цементобетонных, как его паропроницаемость, практически не изменяется.

Помимо основных физико-механических свойств, приведены *дополнительные показатели*, необходимые для оценки пригодности ГФП к применению на аэродромных покрытиях (см. табл. 1). Продолжительность сохранения гидрофобизирующих свойств аэродромных покрытий зависит от содержания полезных кремнийорганических соединений в концентрате. Безопасность эксплуатации аэродромного покрытия обеспечивает показатель уменьшения коэффициента сцепления на мокрой поверхности.

Таблица 1

Пример результатов испытаний образцов с гидрофобизирующей пропиткой

Тип показателей	Наименование показателей	Фактическое значение
Основные	Снижение величины водопоглощения цементобетона при обработке гидрофобизирующей пропиткой, раз	5,5
	Увеличение параметра водонепроницаемости цементобетона после обработки пропиткой, раз	3
	Отношение величины морозостойкости цементобетонной поверхности, обработанной пропиткой по отношению к необработанной, имеющей морозостойкость F200, раз	2,1 (морозостойкость поверхностного слоя покрытия более F300)
	Глубина проникновения ГФП, мм	10,3
Дополнительные	Содержание полезных кремнийорганических соединений в концентрате, %	55
	Уменьшение коэффициента сцепления на мокрой поверхности	Без снижения

Table 1

Example of test results of specimens with hydrophobic impregnation

Type of indicators	Name of indicators	Actual value
Main	Decrease in the amount of water absorption of cement concrete after treatment with hydrophobic impregnation, times	5.5
	Increase in the waterproofness parameter of cement concrete after treatment by impregnation, times	3
	Ratio of frost resistance value of cement concrete surface treated with impregnation in comparison with untreated surface with frost resistance F200, times	2.1 (frost resistance of the surface layer of the coating is more than F300)
	HPI penetration depth, mm	10.3
Additional	The content of useful silicon-organic compounds in the concentrate, %	55
	Reduction of the adhesion coefficient on wet surfaces	No reduction

В [17–19] при обсуждении положительных эффектов, достигаемых после обработки покрытий ГФП, отмечается, что придание поверхности покрытия гидрофобных свойств приводит также и к снижению адгезии льда к данной поверхности. Последнее, в свою очередь, может способствовать снижению расхода ПГР в процессе удаления льдообразований. Для проверки данного предположения проведена серия лабораторных исследований.

2. Методы

В качестве метода исследования зависимости расхода ПГР в процессе удаления льдообразований от состояния цементобетонного покрытия (гидрофобизированного и негидрофобизированного) проведен лабораторный эксперимент, имитирующий процесс образования ледяной корки и ее последующее удаление за счет использования ПГР.

Для моделирования процесса удаления льда с поверхности цементобетонного покрытия изготовлены два образца цементобетонных плит из бетона класса В30 размером 400×450 мм и толщиной 25 мм. Схема лабораторной установки представлена на рис. 1.

В ходе эксперимента одна из плит подвергалась обработке ГФП. В качестве ГФП использовалась пропитка на основе КОС с характеристиками, представленными в табл. 1. Количество ГФП при обработке цементобетонных плит определялось исходя из инструкции по ее применению и составляло $0,35 \text{ кг/м}^2$, что соответствовало 63 граммам пропитки на поверхность плиты площадью $0,18 \text{ м}^2$.

Перед началом испытаний обработанные и не обработанные гидрофобизирующей пропиткой плиты подверглись полному водонасыщению. После завершения процесса водонасыщения на каждую из плит равномерно выливалось и распределялось 250 г воды. После этого плиты помещались в камеру холода тепла и влаги (КХТВ-1.0), где они охлаждались при температуре $-15 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 1 ч. По истечении данного времени происходило образование ледяной корки на поверхности цементобетонных плит (рис. 2).

После образования ледяной корки ее поверхность подвергалась обработке противогололедными реагентами. В качестве ПГР использованы эффективные с точки зрения их плавящей способности материалы на основе солей карбоновых кислот — гранулированный противогололедный реагент и жидкий противогололедный реагент. Жидкий ПГР в количестве 10 г и гранулированный ПГР в количестве 50 г нанесены и равномерно распределены по поверхности обеих плит.

Далее образцы плит с нанесенными на них реагентами вновь помещались в климатическую камеру и выдерживались в ней в течение 40 минут при температуре $-5 \text{ }^\circ\text{C}$. По прошествии указанного времени образовавшийся «рассол» из смеси расплавленного льда и остатков ПГР сливался, а поверхность цементобетонных плит счищалась жесткой щеткой.

Качество процесса удаления льда с поверхности плит оценивалось по показателю массы удаленного льда $M_{\text{л}}$, рассчитываемого по формуле

$$M_{\text{л}} = M_{\text{пл}}^{\text{л}} - M_{\text{пл}}^{\text{ост}}, \quad (1)$$

где $M_{\text{пл}}^{\text{л}}$ — масса плиты с ледяной коркой, г; $M_{\text{пл}}^{\text{ост}}$ — масса плиты после удаления «рассола» и остатков ПГР.

В ходе проведения эксперимента установлено, что количество удаленного льда на плите, обработанной ГФП, в 1,6 раза выше аналогичного количества на плите, не обработанной ГФП. Для исследования зависимости массы удаленного льда от расхода ПГР эксперимент повторялся при постоянном количестве ПГР на негидрофобизированной плите и варьируемом количестве твердого ПГР на гидрофобизированной плите. Варьирование количества наносимого гранулированного ПГР на гидрофобизированную плиту осуществлялось в диапазоне от 35 до 50 г. Соотношения гранулированного и жидкого ПГР от 3,5/1 до 5/1 взяты из опыта эксплуатации аэродромов.

3. Результаты и обсуждение

Полученные в ходе исследований результаты представлены в табл. 2 и на рис. 3.

В результате проведенного лабораторного эксперимента установлено, что вследствие ослабления сил сцепления льда с гидрофобизированной поверхностью цементобетонного покрытия расход ПГР сокращается по сравнению с аналогичным расходом для негидрофобизированных цементобетонных покрытий на 35 %.

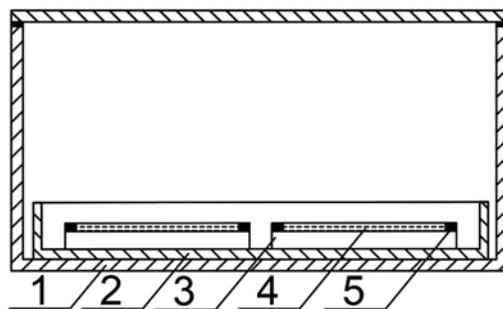


Рис. 1. Схема лабораторной установки:
1 — камера холода, тепла и влаги КХТВ-1.0;
2 — емкость для образцов;
3 — образцы цементобетонных плит;
4 — ледяная корка; 5 — клеевой буртик

Figure 1. Diagram of the laboratory equipment:
1 — cold, heat and moisture chamber CHMC-1.0;
2 — container for specimens;
3 — specimens of cement concrete slabs;
4 — ice crust; 5 — adhesive edge



Рис. 2. Ледяная корка после замораживания плит при температуре $-15 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 1 ч.

Figure 2. Ice crust after freezing of slabs at temperature of $-15 \text{ }^\circ\text{C}$ during 1 hour

Таблица 2

Результаты испытаний по удалению льда

Номер эксперимента	Этап эксперимента	Образец плиты	Суммарная масса ПГР, г	$M_{пл}^л$, г	$M_{пл}^{ост}$, г	$M_{л}$, г
1	1	С ГФП	60	13373	13247	126
		Без ГФП	60	13079	12999	80
	2	С ГФП	55	13368	13256	112
		Без ГФП	60	13079	12999	80
	3	С ГФП	45	13358	13264	94
		Без ГФП	60	13079	12999	80
2	1	С ГФП	60	13371	13248	123
		Без ГФП	60	13079	13000	79
	2	С ГФП	55	13367	13257	110
		Без ГФП	60	13079	13000	79
	3	С ГФП	45	13357	13265	92
		Без ГФП	60	13079	13000	79
3	1	С ГФП	60	13374	13246	128
		Без ГФП	60	13080	12999	81
	2	С ГФП	55	13370	13256	114
		Без ГФП	60	13080	12999	81
	3	С ГФП	45	13358	13263	95
		Без ГФП	60	13080	12999	81

Table 2

Results of ice removal tests

Test number	Stage of test	Specimen of a slab	Total weight of DIR, gr	M_{sl}^l , gr	M_{sl}^{rem} , gr	M_i , gr
1	1	With HPI	60	13373	13247	126
		Without HPI	60	13079	12999	80
	2	With HPI	55	13368	13256	112
		Without HPI	60	13079	12999	80
	3	With HPI	45	13358	13264	94
		Without HPI	60	13079	12999	80
2	1	With HPI	60	13371	13248	123
		Without HPI	60	13079	13000	79
	2	With HPI	55	13367	13257	110
		Without HPI	60	13079	13000	79
	3	With HPI	45	13357	13265	92
		Without HPI	60	13079	13000	79
3	1	With HPI	60	13374	13246	128
		Without HPI	60	13080	12999	81
	2	With HPI	55	13370	13256	114
		Without HPI	60	13080	12999	81
	3	With HPI	45	13358	13263	95
		Without HPI	60	13080	12999	81

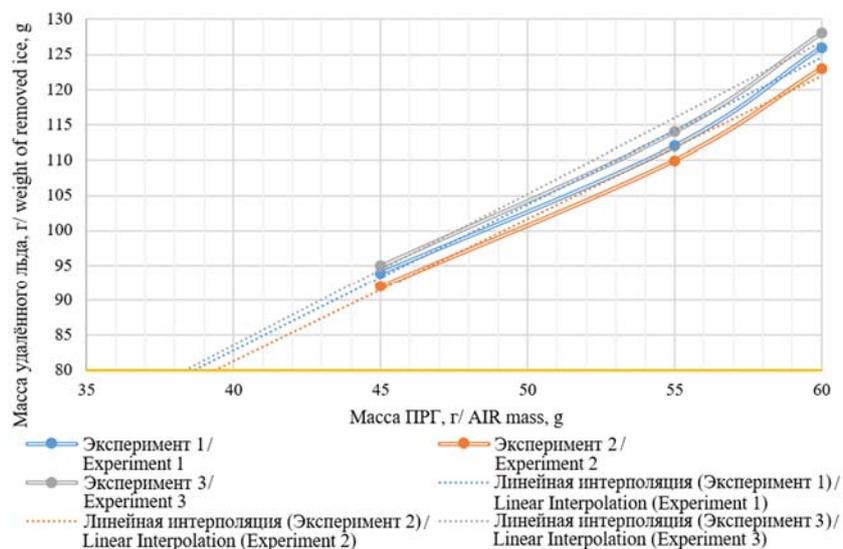


Рис. 3. Зависимость массы удаленного льда на двух образцах цементобетонных плит от массы гранулированного реагента
Figure 3. Dependence of the weight of the removed ice on two specimens of cement concrete slabs on the weight of the granular reagent

Основываясь на результатах экспериментов, поставлена задача оценки экономического эффекта от возможного сокращения расходов ПГР для цементобетонных аэродромных покрытий, обработанных ГФП.

Для оценки возможного экономического эффекта проведен анализ расхода применяемых ПГР на гражданских аэродромах Российской Федерации за 2021–2022 год с учетом их принадлежности к различным климатическим зонам (рис. 4, табл. 3).



Рис. 4. Карта среднегодовой температуры в Российской Федерации
 Источник: <https://geographyofrussia.com/temperatura-vozduxa/> (дата обращения: 12.02.2023 г.)
Figure 4. Map of the average annual temperature in the Russian Federation
 Source: <https://geographyofrussia.com/temperatura-vozduxa/> (accessed: 12.02.2023)

Таблица 3

Количество используемых противогололедных реагентов на аэродромах РФ

Среднегодовая температура, °С	Аэродром	Количество расходуемого ПГР (гранулированный/жидкий), т/год
Ниже –4	Якутск	0/68
	Алроса	0/50
	Сабетта	0/136
	Анадырь	39/137
От –4 до +6	Саратов	46/51
	Череповец	167/161
	Санкт-Петербург	1940/1645
	Москва (Внуково)	2807/1869
	Барнаул	91/51
Выше +6	Волгоград	120/100
	Ростов-на-Дону	110/88
	Грозный (Северный)	40/28
	Анапа (Витязево)	47/0

Table 3

The amount of deicing reagents used on airfields of the Russian Federation

Average annual temperature, °C	Airfield name	Amount of consumable DIR (granular/liquid), tons per year
Less than –4	Yakutsk	0/68
	Alrosa	0/50
	Sabetta	0/136
	Anadyr	39/137
From –4 to +6	Saratov	46/51
	Cherepovets	167/161
	Saint-Petersburg	1940/1645
	Moscow (Vnukovo)	2807/1869
	Barnaul	91/51
More than +6	Volgograd	120/100
	Rostov-on-Don	110/88
	Grozny (Northern)	40/28
	Anapa (Vityazevo)	47/0

Из сводной табл. 4 видно, что в климатических зонах со среднегодовой температурой ниже –4 °С для борьбы с льдообразованием в преобладающем количестве используются жидкие ПГР. В климатических зонах со среднегодовой температурой от –4 до +6 °С в среднем гранулированных ПГР используется больше, чем жидких. В регионах со среднегодовой температурой выше +6 °С больше используются гранулированные ПГР.

Характер применения жидких и гранулированных ПГР существенно зависит от климатических условий региона расположения аэродрома и состояния аэродромных покрытий в периоды возможного появления наледи. В случае образования наледи при низкой влажности применяются как жидкие ПГР, так и комбинация жидких и гранулированных ПГР. В случае выпадения твердых осадков и в случае повышенной влажности применяют гранулированные ПГР.

Суммарный объем применяемых ПГР существенно зависит от интенсивности полетов воздушных судов, что видно из табл. 3. В связи с этим в дальнейшем процессе экономического анализа целесообразно аэродромы с высокой и умеренной интенсивностью полета воздушных судов рассматривать отдельно.

Таблица 4

Экономический эффект от сокращения расхода ПГР

Аэродром	Продолжительность сохранения гидрофобизирующих свойств, г	Экономический эффект, млн руб.	Экономический эффект, %
Аэропорты с высокой интенсивностью полетов	1	45,6	11,5
	2	180,9	23,3
	3	316,2	27,2
	4	451,6	29,1
Аэропорты с умеренной интенсивностью полетов	1	-4,5	-66,9
	2	-0,1	-15,9
	3	4,4	1,0
	4	8,9	9,5

Table 4

The economic effect due to reduction of DIR consumption

Airfield	Duration of preservation of hydrophobic properties, year	Economic effect, million rubles	Economic effect, %
Airports with high flight intensity	1	45.6	11.5
	2	180.9	23.3
	3	316.2	27.2
	4	451.6	29.1
Airports with medium flight intensity	1	-4.5	-66.9
	2	-0.1	-15.9
	3	4.4	1.0
	4	8.9	9.5

Механизм воздействия как жидких, так и гранулированных ПГР на процесс удаления льдообразований на практике мало отличается друг от друга. По этой причине при дальнейших расчетах принималось, что величина сокращения расхода ПГР, полученная в ходе экспериментальных исследований для гранулированных ПГР, распространяется также и на жидкие ПГР.

Последующая экономическая оценка основывается на ценовых показателях, принятых из опыта эксплуатации аэродромов РФ. При расчете экономического эффекта от возможного сокращения расхода ПГР применительно к аэродромным покрытиям, обработанным ГФП, учитывался удельный расход ГФП на единицу площади аэродромных покрытий, средняя стоимость ПГР и ГФП, продолжительность сохранения гидрофобизирующих свойств аэродромных покрытий, обработанных ГФП, средний годовой расход ПГР, площади аэродромов.

В связи с тем что продолжительность сохранения гидрофобизирующих свойств аэродромных покрытий, обработанных ГФП, зависит от многих факторов и не подтверждается экспериментально в ходе проверок ПГР на их пригодность к применению, оценка срока очередной обработки ГФП представляется затруднительной. Возможны ситуации, когда гидрофобизирующие свойства покрытий уже утрачены, а срок очередной обработки покрытий ГФП еще не наступил. В этом случае возможен рост расхода ПГР, а его величина должна определяться в ходе дальнейших расчетов.

Прогнозируемая продолжительность сохранения гидрофобизирующих свойств, принимаемая к расчету, имеет диапазон значений от 1 до 4 лет, исходя из рекомендаций производителей ГФП и опыта их применения на аэродромах.

Экономический эффект от сокращения расхода ПГР на аэродромных покрытиях, не обработанных ГФП, млн руб., рассчитывается из следующего выражения:

$$Q = P_{\text{безГФП}}^{\text{ПГР}} - P_{\text{СГФП}}^{\text{ПГР}}, \quad (2)$$

где $P_{\text{безГФП}}^{\text{ПГР}}$ — суммарная стоимость ПГР для аэродромных покрытий, не обработанных ГФП, млн руб.; $P_{\text{СГФП}}^{\text{ПГР}}$ — суммарная стоимость ПГР и ГФП для аэродромных покрытий, обработанных ГФП, млн руб.

Относительный экономический эффект от сокращения расхода ПГР для аэродромных покрытий, не обработанных ГФП, %:

$$Q_{\%} = \frac{Q}{P_{\text{безГФП}}^{\text{ПГР}}} - 100 \%. \quad (3)$$

Суммарная стоимость ПГР для аэродромных покрытий, не обработанных ГФП, млн руб.:

$$P_{\text{безГФП}}^{\text{ПГР}} = (V^{\text{ЖПГР}} P^{\text{ЖПГР}} + V^{\text{ГПГР}} P^{\text{ГПГР}}) T, \quad (4)$$

где $V^{\text{ЖПГР}}$ — расход жидкого ПГР в год, т/год; $P^{\text{ЖПГР}}$ — стоимость тонны жидкого ПГР, млн. руб.; $V^{\text{ГПГР}}$ — расход гранулированного ПГР в год, т/год; $P^{\text{ГПГР}}$ — стоимость тонны гранулированного ПГР, млн руб.; T — продолжительность сохранения гидрофобизирующих свойств аэродромных покрытий, год.

Суммарная стоимость ПГР и ГФП для аэродромных покрытий, обработанных ГФП, млн руб.:

$$P_{\text{СГФП}}^{\text{ПГР}} = (1 - k_{\text{эф}})(V^{\text{ЖПГР}} P^{\text{ЖПГР}} + V^{\text{ГПГР}} P^{\text{ГПГР}}) T + q^{\text{ГФП}} S^A P^{\text{ГФП}}, \quad (5)$$

где $k_{\text{эф}}$ — коэффициент эффективности сокращения расхода ПГР при применении ГФП, принятый по результатам эксперимента, $k_{\text{эф}} = 0,35$; $q^{\text{ГФП}}$ — удельный расход ГФП, л/м²; S^A — площадь обрабатываемого аэродромного покрытия, м²; $P^{\text{ГФП}}$ — стоимость ГФП, руб./л.

Результаты расчетов представлены в виде сводной таблицы и графиков зависимости экономического эффекта от сокращения расхода ПГР при отсутствии гидрофобизирующих свойств аэродромных покрытий в зависимости от его срока службы (см. табл. 4, рис. 5).

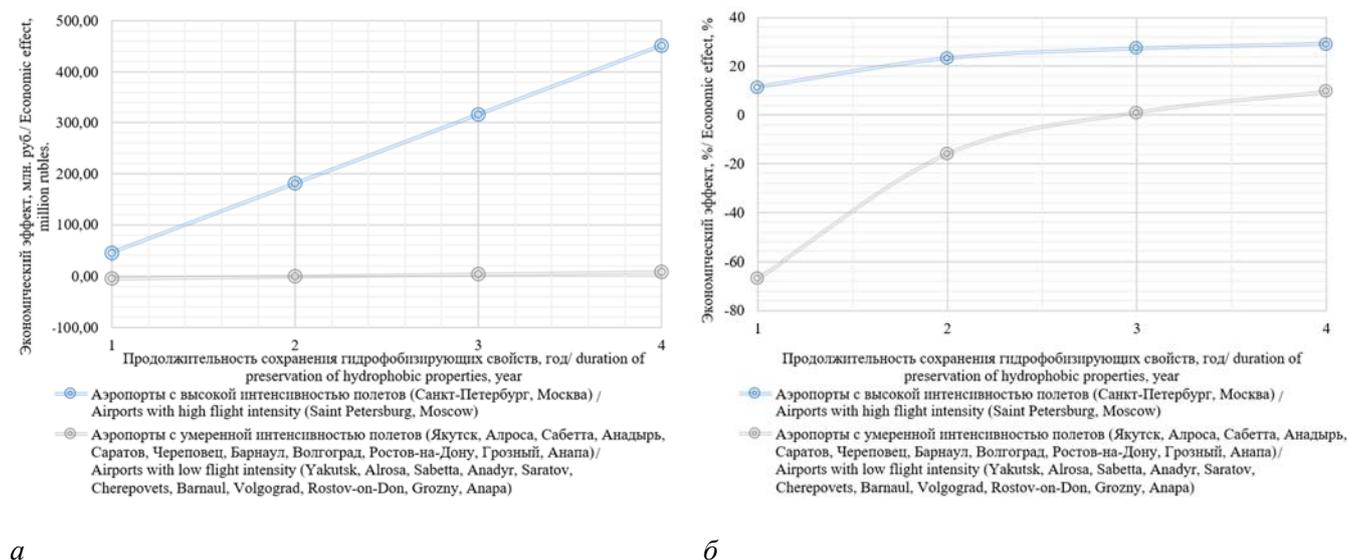


Рис. 5. Экономический эффект при сокращении расхода противогололедных реагентов от использования гидрофобизатора:

a — в млн руб.; b — в %

Figure 5. The economic effect from reducing deicing reagents when using a hydrophobizer:

a — in mln rubles; b — in %

По результатам проведенных исследований установлено, что наибольший экономический эффект от сокращения расхода ПГР для аэродромных покрытий, обработанных ГФП, достигается для аэродромов с высокой интенсивностью полета воздушных судов.

Для аэродромов с умеренной интенсивностью полетов воздушных судов положительный эффект достигается только в том случае, если продолжительность сохранения гидрофобизирующих свойств аэродромных покрытий, обработанных ГФП, составляет не менее 3 лет.

Помимо полученного в результате исследования положительного экономического эффекта от снижения расхода ПГР для аэродромных покрытий, обработанных ГФП, необходимо указать и на дополнительный положительный эффект — повышение коррозионной стойкости цементобетонных аэродромных покрытий [20–22]. Последнее наиболее актуально в тех случаях, когда для борьбы с льдообразованием применяются контрафактные ПГР, а также ПГР, не прошедшие проверку на коррозионную стойкость бетонов. Высокая агрессивность ПГР к бетонам приводит к негативным факторам в виде разрушений поверхностного слоя цементобетонного покрытия [23–25]. На рис. 6 представлен характер разрушений цементобетонных образцов в ходе проведения испытаний в ИЦ АО «ПИИНИИ ВТ «Ленаэропроект» одного из ПГР с коррозионными свойствами, соизмеримыми со свойствами 5 % раствора поваренной соли.



Рис. 6. Вид цементобетонных образцов после проведения испытаний на коррозионную стойкость (образцы 1–3 подвергались воздействию ПГР, образцы 4–6 подвергались воздействию 5% раствора поваренной соли)

Figure 6. View of cement concrete specimens after corrosion resistance tests (specimens 1–3 were exposed to DIR, specimens 4–6 were exposed to 5% salt solution)

4. Заключение

1. Полученные результаты исследований подтверждают предположение о возможном сокращении расхода ПГР применительно к цементобетонным поверхностям плит, обработанных ГФП. В результате лабораторного эксперимента, имитирующего процесс льдообразования и последующего удаления ледяной корки с применением ПГР, установлено, что величина возможного сокращения расхода ПГР для цементобетонных плит, обработанных ГФП, достигает величины 35 % по отношению к аналогичному расходу ПГР для цементобетонных плит, не обработанных ПГР.

2. Результаты оценки достигаемого экономического эффекта от сокращения расхода ПГР для аэродромных покрытий, обработанных ГФП, показали, что наибольший экономический эффект 29,1 % достигается применительно к аэродромам с высокой интенсивностью полетов воздушных судов. Для аэродромов с умеренной интенсивностью полетов воздушных судов положительный экономический эффект достигается при условии того, что продолжительность сохранения гидрофобизирующих свойств аэродромных поверхностей, обработанных ГФП, будет составлять не менее 3 лет.

3. В связи с тем, что в настоящее время отсутствуют объективные сведения о продолжительности сохранения гидрофобизирующих свойств для цементобетонных покрытий, обработанных ГФП, подтвержденные результатами независимых испытаний на климатических установках, становится актуальной задача проведения таких исследований.

4. При проведении исследований на климатических установках, имитирующих процессы воздействия негативных факторов окружающей среды, с целью определения реальных сроков сохранения гидрофобизирующих свойств аэродромных покрытий необходимо также предусмотреть возможность исследования фактора химической совместимости ПГР и ГФП. Последнее, в свою очередь, позволит не только максимально приблизить экспериментальные условия с реальными, но и сделать более точной оценку достигаемого экономического эффекта.

Список литературы

1. Salam M., Mamat R., Rusnardi R. Effect of The Composition of Hydrophobic Agents on The Contact Angle and Strength of Mortar Cement // *Journal of Physics: Conference Series*. 2022. Vol. 2309. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2309/1/012010>

2. *Septiana D., Ratnawulan R., Syaputri O., Salam M.* The Effect of Calcium Carbonate (CaCO₃) and Polystyrene (PS) Composition on Contact Angle and Compressive Strength of Hydrophobic Cement Mortar // *Journal of Physics: Conference Series*. 2022. Vol. 2309. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2309/1/012003>
3. *Szafraniec M., Omiotek Z., Barnat-Hunek D.* Water absorption prediction of nanopolymer hydrophobized concrete surface using texture analysis and machine learning algorithms // *Construction and Building Materials*. 2023. Vol. 375. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130969>
4. *Wang J., Li P., Yu P., Leydecker T., Bayer I., Losic D., Neogi A., Wang Z.* Efficient photothermal deicing employing superhydrophobic plasmonic MXene composites // *Advanced Composites and Hybrid Materials*. 2022. Vol. 5. P. 3035–3044. <https://doi.org/10.1007/s42114-022-00549-5>
5. *Wang D., Zhu Q., Xing Z., Fang L.* Control of chloride ion corrosion by MgAlO_x/MgAlFeO_x in the process of chloride deicing // *Environmental Science and Pollution Research*. 2022. Vol. 29. P. 9269–9281. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16205-2>
6. *Konovalova V.* Investigation of the Effect of Volumetric Hydrophobization on the Kinetics of Mass Transfer Processes Occurring in Cement Concretes during Corrosion // *Materials*. 2023. Vol. 16. P. 3827. <https://doi.org/10.3390/ma16103827>
7. *Álvarez A., Ordieres-Meré J., Loreiro A., Marcos L.* Opportunities in airport pavement management: Integration of BIM, the IoT and DLT // *Journal of Air Transport Management*. 2021. Vol. 90. <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2020.101941>
8. *Nam B.* In-situ super accelerated pavement test for the fatigue evaluation of in-service airfield rigid pavement — A case study at Meham Airport // *Construction and Building Materials*. 2022. Vol. 353. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129115>
9. *Armeni A., Loizos A.* Preliminary evaluation of the ACR-PCR system for reporting the bearing capacity of flexible airfield pavements // *Transportation Engineering*. 2022. Vol. 8. <https://doi.org/10.1016/j.treng.2022.100117>
10. *Shill S., Al-Deen S., Ashraf V., Elahi M., Subhani M., Hutchison W.* A comparative study on the performance of cementitious composites resilient to airfield conditions // *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 282. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122709>
11. *Wu Y., Dong L., Shu X., Yang Y., She W., Ran Q.* A review on recent advances in the fabrication and evaluation of superhydrophobic concrete // *Composites Part B: Engineering*. 2022. Vol. 237. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2022.109867>
12. *Zhang C., Zhang S., Yu J., Kong X.* Water absorption behavior of hydrophobized concrete using silane emulsion as admixture // *Cement and Concrete Research*. 2022. Vol. 154. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.106738>
13. *Xue X., Li Y., Yang Z., He Z., Dai J., Xu L., Zhang W.* A systematic investigation of the waterproofing performance and chloride resistance of a self-developed waterborne silane-based hydrophobic agent for mortar and concrete // *Construction and Building Materials*. 2017. Vol. 155. P. 939–946. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.042>
14. *Materak K., Wieczorek A., Bednarska D., Koniorczyk M.* Internal hydrophobization of cement-based materials by means of silanes // *Journal of Physics: Conference Series*. 2023. Vol. 2521. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2521/1/012009>
15. *Feng C., Janssen H.* Impact of water repellent agent concentration on the effect of hydrophobization on building materials // *Journal of Building Engineering*. 2021. Vol. 39. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102284>
16. *Zarzuela R., Luna M., Coneo J., Gemelli G., Andreouli D., Kaloidas V., Mosquera M.* Multifunctional silane-based superhydrophobic/impregnation treatments for concrete producing C-S-H gel: Validation on mockup specimens from European heritage structures // *Construction and Building Materials*. 2023. Vol. 367. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.130258>
17. *Пишембаев М., Ковалев Я., Яглов В., Гуринский В.* Способы борьбы с зимней скользкостью // *Наука и техника*. 2020. Т. 19. № 3. С. 230–240. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-3-230-240>
18. *Zhang Y., Chen L., Liu H.* Study on ice adhesion of composite anti-/deicing component under heating condition // *Advanced Composites Letters*. 2020. Vol. 29. <https://doi.org/10.1177/2633366X20912440>
19. *Boinovich L., Emelyanenko K., Emelyanenko A.* Superhydrophobic versus SLIPS: Temperature dependence and the stability of ice adhesion strength // *Journal of Colloid and Interface Science*. 2022. Vol. 606. Part 1. P. 556–566. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2021.08.030>
20. *Szymańska A., Dutkiewicz M., Maciejewski H., Palacz M.* Simple and effective hydrophobic impregnation of concrete with functionalized polybutadienes // *Construction and Building Materials*. 2022. Vol. 315. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125624>
21. *Tkach E., Semenov V., Tkach S., Rozovskaya T.* Highly Effective Water-repellent Concrete with Improved Physical and Technical Properties // *Procedia Engineering*. 2015. Vol. 111. P. 763–769. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.07.143>
22. *Gao D., Yang L., Pang Y., Li Z., Tang Q.* Effects of a novel hydrophobic admixture on the sulfate attack resistance of the mortar in the wet-dry cycling environment // *Construction and Building Materials*. 2022. Vol. 344. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128148>
23. *Gruber M. R., Hofko B., Hoffmann M., Stinglmayr D., Seifried T. M., Grothe H.* Deicing performance of common deicing agents for winter maintenance with and without corrosion-inhibiting substances // *Cold Regions Science and Technology*. 2023. Vol. 208. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2023.103795>

24. Gruber M.R., Hofko B., Hoffmann M., Stinglmayr D., Grothe H. Analysis of metal corrosion methods and identification of cost-efficient and low corrosion deicing agents // *Corrosion Engineering Science and Technology*. 2023. Vol. 58. P. 452–463. <https://doi.org/10.1080/1478422X.2023.2200008>
25. Zhang J., Wang W., Liu J., Wang S., Qin X., Yu B. Pavement Performance and Ice-Melting Characteristics of Asphalt Mixtures Incorporating Slow-Release Deicing Agent // *Buildings*. 2023. Vol. 13. Issue 2. <https://doi.org/10.3390/buildings13020306>

References

1. Salam M., Mamat R., Rusnardi R. Effect of The Composition of Hydrophobic Agents on The Contact Angle and Strength of Mortar Cement. *Journal of Physics: Conference Series*. 2022;2309:012010. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2309/1/012010>.
2. Septiana D., Ratnawulan R., Syaputri O., Salam M. The Effect of Calcium Carbonate (CaCO₃) and Polystyrene (PS) Composition on Contact Angle and Compressive Strength of Hydrophobic Cement Mortar. *Journal of Physics: Conference Series*. 2022;2309:012003. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2309/1/012003>
3. Szafraniec M., Omiotek Z., Barnat-Hunek D. Water absorption prediction of nanopolymer hydrophobized concrete surface using texture analysis and machine learning algorithms. *Construction and Building Materials*. 2023;375:130969. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130969>
4. Wang J., Li P., Yu P., Leydecker T., Bayer I., Losic D., Neogi A., Wang Z. Efficient photothermal deicing employing superhydrophobic plasmonic MXene composites. *Advanced Composites and Hybrid Materials*. 2022;5:3035–3044. <https://doi.org/10.1007/s42114-022-00549-5>
5. Wang D., Zhu Q., Xing Z., Fang L. Control of chloride ion corrosion by MgAlOx/MgAlFeOx in the process of chloride deicing. *Environmental Science and Pollution Research*. 2022;29:9269–9281. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16205-2>
6. Konovalova V. Investigation of the Effect of Volumetric Hydrophobization on the Kinetics of Mass Transfer Processes Occurring in Cement Concretes during Corrosion. *Materials*. 2023;16:3827. <https://doi.org/10.3390/ma16103827>
7. Álvarez A., Ordieres-Meré J., Loreiro A., Marcos L. Opportunities in airport pavement management: Integration of BIM, the IoT and DLT. *Journal of Air Transport Management*. 2021;90:101941. <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2020.101941>
8. Nam B. In-situ super accelerated pavement test for the fatigue evaluation of in-service airfield rigid pavement — A case study at Meham Airport. *Construction and Building Materials*. 2022;353:129115. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129115>
9. Armeni A., Loizos A. Preliminary evaluation of the ACR-PCR system for reporting the bearing capacity of flexible airfield pavements. *Transportation Engineering*. 2022;8:100117. <https://doi.org/10.1016/j.treng.2022.100117>
10. Shill S., Al-Deen S., Ashraf V., Elahi M., Subhani M., Hutchison W. A comparative study on the performance of cementitious composites resilient to airfield conditions. *Construction and Building Materials*. 2021;282:122709. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122709>
11. Wu Y., Dong L., Shu X., Yang Y., She W., Ran Q. A review on recent advances in the fabrication and evaluation of superhydrophobic concrete. *Composites Part B: Engineering*. 2022;237:109867. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2022.109867>
12. Zhang C., Zhang S., Yu J., Kong X. Water absorption behavior of hydrophobized concrete using silane emulsion as admixture. *Cement and Concrete Research*. 2022;154:106738. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.106738>
13. Xue X., Li Y., Yang Z., He Z., Dai J., Xu L., Zhang W. A systematic investigation of the waterproofing performance and chloride resistance of a self-developed waterborne silane-based hydrophobic agent for mortar and concrete. *Construction and Building Materials*. 2017;155:939–946. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.042>
14. Materak K., Wiczorek A., Bednarska D., Koniorczyk M. Internal hydrophobization of cement-based materials by means of silanes. *Journal of Physics: Conference Series*. 2023;2521:012009. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2521/1/012009>
15. Feng C., Janssen H. Impact of water repellent agent concentration on the effect of hydrophobization on building materials. *Journal of Building Engineering*. 2021;39:102284. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102284>
16. Zarzuela R., Luna M., Coneo J., Gemelli G., Andreouli D., Kaloidas V., Mosquera M. Multifunctional silane-based superhydrophobic/impregnation treatments for concrete producing C-S-H gel: Validation on mockup specimens from European heritage structures. *Construction and Building Materials*. 2023;367:130258. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.130258>
17. Pshembaev M., Kovalev Ya., Yaglov V., Girinsky V. Ways to combat winter slipperiness. *Science & Technique*. 2020;19(3):230–240. (In Russ.) <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-3-230-240>
18. Zhang Y., Chen L., Liu H. Study on ice adhesion of composite anti-/deicing component under heating condition. *Advanced Composites Letters*. 2020;29. <https://doi.org/10.1177/2633366X20912440>
19. Boinovich L., Emelyanenko K., Emelyanenko A. Superhydrophobic versus SLIPS: Temperature dependence and the stability of ice adhesion strength. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2022;606(1):556–566. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2021.08.030>

20. Szymańska A., Dutkiewicz M., Maciejewski H., Palacz M. Simple and effective hydrophobic impregnation of concrete with functionalized polybutadienes. *Construction and Building Materials*. 2022;315:125624. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125624>
21. Tkach E., Semenov V., Tkach S., Rozovskaya T. Highly Effective Water-repellent Concrete with Improved Physical and Technical Properties. *Procedia Engineering*. 2015;111:763–769. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.07.143>
22. Gao D., Yang L., Pang Y., Li Z., Tang Q. Effects of a novel hydrophobic admixture on the sulfate attack resistance of the mortar in the wet-dry cycling environment. *Construction and Building Materials*. 2022;344:128148. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128148>
23. Gruber M.R., Hofko B., Hoffmann M., Stinglmayr D., Seifried T.M., Grothe H. Deicing performance of common deicing agents for winter maintenance with and without corrosion-inhibiting substances. *Cold Regions Science and Technology*. 2023;208:103795. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2023.103795>
24. Gruber M.R., Hofko B., Hoffmann M., Stinglmayr D., Grothe H. Analysis of metal corrosion methods and identification of cost-efficient and low corrosion deicing agents. *Corrosion Engineering Science and Technology*. 2023;58:452–463. <https://doi.org/10.1080/1478422X.2023.2200008>
25. Zhang J., Wang W., Liu J., Wang S., Qin X., Yu B. Pavement Performance and Ice-Melting Characteristics of Asphalt Mixtures Incorporating Slow-Release Deicing Agent. *Buildings*. 2023;13(2):306. <https://doi.org/10.3390/buildings13020306>