

УДК 620.1

С.В. Кондрашов¹, А.А. Пыхтин¹, Л.В. Соловьянчик¹, В.А. Большаков¹, Б.Ф. Павлюк¹,
Э.Р. Бадамшина², А.С. Джалмуханова², С.В. Карпов²

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ АДГЕЗИИ ЛЬДА К ПОЛИУРЕТАНОВЫМ ПОКРЫТИЯМ ОТ ИХ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-3-87-95

Разработка материалов, предотвращающих обледенение различных конструкций, является одной из актуальных задач современной полимерной промышленности. В данной работе проведены исследования адгезионных характеристик льда к покрытиям на основе полиуретанов различных марок: полипропиленгликоль, полибутиленадипинат, поликапролактондиол, фторсодержащий олигодидиол марки МАОК, в том числе модифицированных углеродными нанотрубками Таунит-МД. Проведены исследования зависимости динамического модуля упругости полимерных матриц от температуры.

Показано, что модуль упругости исследованных покрытий лежит в диапазоне от 116 до 297 МПа. Величина адгезии льда к исследуемым покрытиям составляет от 40 до 210 кПа. Введение в состав исходных полиуретановых композиций углеродных нанотрубок приводит к снижению температуры стеклования покрытий. Установлено, что величина адгезии льда к исследуемым покрытиям определяется толщиной покрытия, плотностью сетки поперечных химических швов, а также структурой физической сетки зацепления.

Ключевые слова: адгезия льда, обледенение, полиуретановые покрытия, антиобледенительные покрытия, функциональные покрытия.

S.V. Kondrashov¹, A.A. Pykhtin¹, L.V. Solovyanchik¹, V.A. Bolshakov¹, B.Ph. Pavlyuk¹,
E.R. Badamshina², A.S. Dzhal mukhanova², S.V. Karpov²

RESEARCH OF DEPENDENCE OF ADHESION OF ICE TO POLYURETHANE COATINGS FROM THEIR PHYSICOMECHANICAL PROPERTIES

Development of the materials preventing frosting of various designs is one of relevant tasks of the modern polymeric industry. In this work, we studied the adhesion characteristics of ice to coatings based on polyurethanes of various grades: polypropylene glycol, polybutylene adipate, polycaprolactone diol, fluorine-containing oligodiol of the MAOK brand, including those modified with carbon Taunit-MD nanotubes. Researches of dependence of the dynamic module of elasticity of polymeric matrixes on temperature are conducted.

It is shown that the elastic modulus of the investigated coatings lies in the range from 116 to 297 MPa. The amount of adhesion of ice to the investigated coatings ranges from 40 to 210 kPa. Introduction to structure of initial polyurethane compositions of carbon nanotubes leads to decrease in glass transition temperature the coatings. It is established that the size of adhesion of ice to the studied coatings is defined by the coatings thickness, density of a grid of cross chemical stitchings and also structure of a physical grid of gearing.

Keywords: ice adhesion, icing, polyurethane coatings, anti-icing coatings, functional coatings.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт проблем химической физики Российской академии наук» [Federal State Budgetary Institution of Science «Institute of Problems of Chemical Physics of Russian Academy of Sciences»]; e-mail: office@icp.ac.ru

Введение

В настоящее время разработка функциональных материалов, позволяющих решить ряд технологических и эксплуатационных вопросов, занимает особое место в современном материаловедении [1–6]. Одной из самых актуальных задач, в частности для авиастроения, является предотвращение обледенения различных конструкций [7, 8].

Обледенение происходит в результате понижения температуры в условиях повышенной влажности, оседания тумана, дождя или брызг. Нарастание льда на проводах линий электропередач (ЛЭП), контактных сетях железнодорожного и городского электротранспорта может достигать 20 см [9], что приводит к обрыву проводов, обрушению опор и человеческим жертвам. Образование сосулек на наклонных крышах, козырьках и навесах в регионах наступает одновременно и массово, чтобы предотвратить это явление необходимы значительные капитало- и энергозатраты. Обледенение лопастей ветровых электрогенераторов [10], морских нефтедобывающих платформ [11] и корабельных надстроек [12] неизбежно приводит к разрушению конструкций, ухудшению их характеристик и, как следствие, существенным финансовым потерям. Наиболее остро проблема обледенения стоит для воздушных судов, особенно так называемое «топливное обледенение», которое может возникнуть при положительных температурах – даже при +15°C. Обледенение несущих плоскостей летательных аппаратов – хвостового оперения, передней кромки крыла, воздухозаборника двигателя, лопасти винтов [13] – приводит к увеличению сопротивления, падению скорости полета, ухудшению устойчивости и управляемости летательного аппарата, что является частой причиной аварий, неминуемо приводящих к гибели всех пассажиров.

Новые и традиционные способы борьбы с обледенением, такие как ультразвуковая очистка, омический нагрев, механическое удаление льда, требуют усложнения конструкции, больших трудовых и энергетических затрат. Использование антиобледенительных реагентов на основе солей и летучих компонентов не гарантирует отсутствия обледенения, а лишь замедляет скорость нарастания льда, кроме того, это является кратковременным решением. Применение таких веществ также может приводить к возникновению экологических проблем [14–16].

Существенно увеличить эффективность работы систем, предотвращающих обледенение, позволяет использование антиобледенительных покрытий, обладающих малой адгезией льда к поверхности. Именно этим объясняется пристальный интерес исследователей к разработке материалов такого типа [17, 18].

В качестве антиобледенительных покрытий могут быть использованы сверхгидрофобные и *slip* поверхности, покрытия на основе органогелей, а также кремнийорганических олигомеров [18], которые за счет малого контакта капли с поверхностью позволяют увеличить задержку времени замерзания капель воды, а также повысить их транспортную способность. Эффективность таких покрытий доказана не только лабораторными измерениями, но и экспериментами, моделирующими натурные условия эксплуатации [19, 20]. Ряд авторов связывают малую адгезию льда с низкой поверхностной энергией покрытий на основе полидиметилсилоксана и его фторсодержащих блок-сополимеров [21–25].

Однако исследования, проведенные авторами работ [19, 26, 27], позволяют предположить, что малая адгезия льда определяется не только величиной поверхностной энергией, но и в той же степени деформативной способностью таких покрытий. Это обстоятельство открывает подход к поиску новых полимерных матриц для антиобледенительных покрытий, обладающих большей стойкостью к воздействию эксплуатационных факторов – в частности, к истиранию.

Цель данной работы – исследование адгезионных характеристик льда к полиуретановым покрытиям, в том числе модифицированных углеродными нанотрубками.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 15. «Наноструктурированные, аморфные материалы и покрытия» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].

Материалы и методы

В качестве полимерной матрицы исследуемых покрытий использованы полиуретаны различных марок, которые широко применяются в промышленности: полипропиленгликоль (ППГ), полибутиленадипинат (ПДЭГА), поликапролактондиол (ПКЛ) и фторсодержащий олигодиол марки МАОК, синтезированные по методике, описанной в работе [28].

Для модификации данных составов использованы углеродные нанотрубки (УНТ) марки Таунит-МД производства ООО «НаноТехЦентр».

Для дезагрегации нанотрубок их подвергали ультразвуковой обработке в полиуретановой дисперсии в присутствии поверхностно-активного вещества марки ТW-80. Содержание нанотрубок составляло 0,5% (по массе).

Как исходные, так и наполненные нанотрубками дисперсии полиуретанов наносили на подложки из полиамида с адгезионным подслоем методом полива. Полученные покрытия выдерживали 1 сут при комнатной температуре, после чего еще 1 сут – при температуре 60°C.

Для измерения величины модуля упругости использовали прибор DMA 861 фирмы Mettler-Toledo в температурном диапазоне от -50 до +100°C при скорости нагрева 5°C/мин, амплитуде деформации 5 мкм, силе нагружения 13 Н, частоте нагружения 1 Гц. Выбран режим деформации – сдвиг, температура измерения -15°C.

Необходимо отметить, что использованная методика измерения дает эффективное значение величины модуля сдвига

$$E=G/h, \quad (1)$$

где G – истинное значение модуля; h – толщина покрытия.

На рис. 1 приведены типичные кривые зависимости модуля сдвига от температуры для покрытий на основе полиуретана марки МАОК в исходном состоянии и модифицированного УНТ. Как видно из приведенных кривых, при данной температуре покрытия находятся в стеклообразном состоянии. Повышение значения модуля сдвига перед «расстекловыванием» полимерной матрицы, вероятно, связано с увеличением площади контакта при нагревании покрытия.

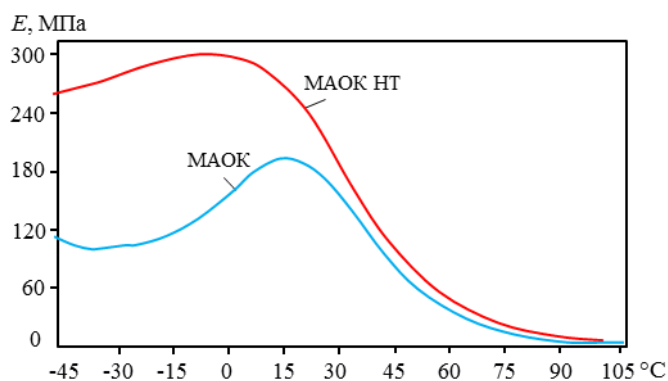


Рис. 1. Типичные кривые температурной зависимости модуля сдвига (E) для покрытий на основе полиуретана марки МАОК в исходном состоянии и модифицированного УНТ

Краевой угол смачивания определяли при помощи установки ОСА 15. Угол оттекания покрытий определяли по форме капли объемом 20 мкл.

Для измерения адгезии льда к поверхности покрытия на его поверхность «примораживали» часть батистовой ленты размером 20×20 мм, которую перед этим обильно смачивали дистиллированной водой. Перед испытанием образцы термостатировали при температуре -15°С в течение 12 ч. Подложку с покрытием и свободный (несмоченный) конец ленты закрепляли в зажимах разрывной машины. Для испытаний использовали разрывную машину Zwick/Roell Z100, снабженную холодильной камерой. Скорость движения зажимов составляла 10 мм/мин при температуре проведения испытаний -15°С. За величину адгезии принимали нагрузку в момент отрыва ленты от покрытия, нормированную на площадь контакта ленты с покрытием.

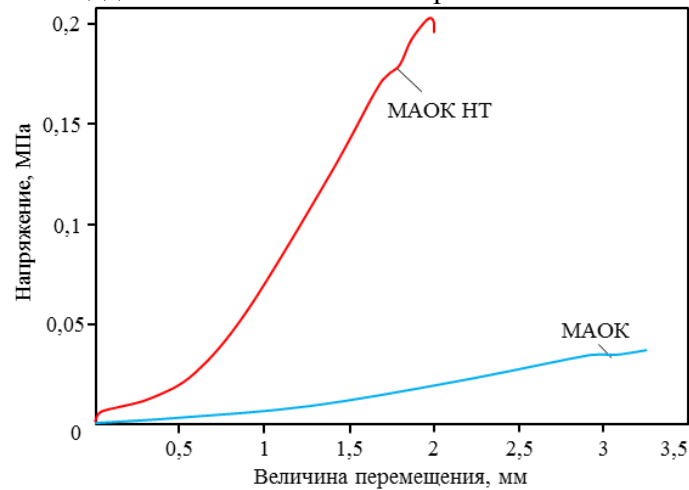


Рис. 2. Типичная зависимость напряжения от деформации для покрытий на основе полиуретана марки МАОК в исходном состоянии и модифицированного УНТ

На рис. 2 приведены зависимости напряжения от деформации в ходе испытаний для покрытий на основе полиуретана марки МАОК в исходном состоянии и модифицированного УНТ. Видно, что величина напряжения для исследуемых покрытий нелинейно возрастает с увеличением деформации. Следует отметить, что подобный характер зависимости напряжения от деформации наблюдался для всех исследованных образцов.

Результаты и обсуждение

В таблице приведены характеристики исследованных полиуретановых покрытий: динамический модуль сдвига E (при температуре -15°С), адгезия льда σ , температура стеклования T_c , угол оттекания $\theta_{гес}$, краевой угол смачивания ϕ , толщина покрытия h .

Характеристики полиуретановых покрытий

Тип покрытия	Динамический модуль сдвига E , МПа	Адгезия льда к покрытию σ , кПа	Температура стеклования T_c , °С	Угол оттекания $\theta_{гес}$	Краевой угол смачивания ϕ	Толщина покрытия h , мм
МАОК	116	40	21,28	20	57,29	0,75
ПДЭГА с УНТ	135	70	28,48	31	66,78	0,46
ПКЛ с УНТ	139	80	5,07	30	67,6	0,21
ПКЛ	149	140	26,43	34	67,6	0,56
ППГ с УНТ	200	140	28,28	22	47,4	0,51
ППГ	211	190	29,83	19	46,2	0,47
ПДЭГА	250	160	29,64	29	65,09	0,68
МАОК с УНТ	297	210	7,95	31	56,56	0,40

Как видно из приведенных в таблице данных, эффективный модуль упругости исследованных покрытий находится в диапазоне значений – от 116 до 297 МПа. При этом величина адгезии увеличивается от 40 до 210 кПа. Введение в состав исходных композиций УНТ приводит к снижению температуры стеклования покрытий. Однако если в случае покрытий на основе ПДЭГ и ППП уменьшение температуры стеклования составляет 1,1–1,5°C, то в случае покрытий на основе МАОК и ПКЛ температура снижается существенно – на 13–21°C. Механизм данного эффекта требует дальнейшего исследования.

Величина угла оттекания исследованных покрытий лежит в интервале – от 19 до 34 градусов, что не может объяснить существенного изменения величины адгезии льда к покрытиям [21]. Все исследованные покрытия являются гидрофильными. Величина краевого угла смачивания изменяется от 46 до ~67 градусов. Введение в состав покрытия УНТ не приводит к заметным изменениям краевого угла смачивания.

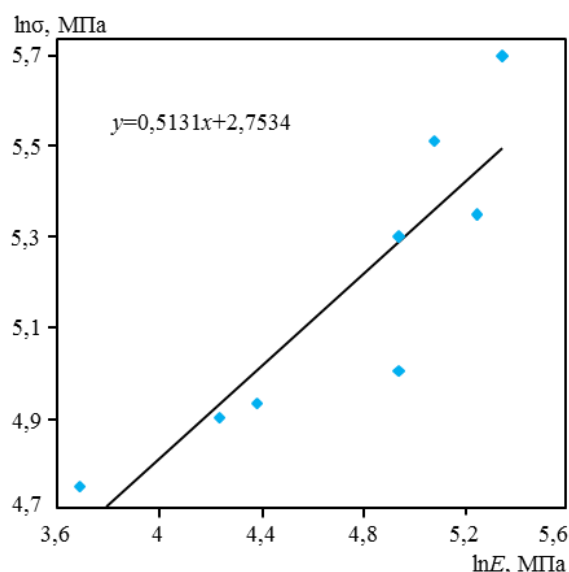


Рис. 3. Зависимость величины адгезии льда к исследованным покрытиям от величины эффективного модуля сдвига в логарифмических координатах

На рис. 3 приведена зависимость величины адгезии льда к исследованным покрытиям от величины эффективного модуля сдвига в логарифмических координатах. Видно, что в логарифмических координатах экспериментальная зависимость хорошо аппроксимируется линейной функцией с тангенсом угла наклона, равным 0,51. Таким образом, величина адгезии оказывается пропорциональной \sqrt{E} .

Из результатов, приведенных в таблице, следует, что все исследованные покрытия имеют температуру стеклования выше, чем температура испытания при определении адгезии, т. е. все покрытия во время испытаний находились в стеклообразном состоянии. В этом случае величина модуля упругости E определяется не только толщиной покрытия и плотностью сетки поперечных химических сшивок, но и (возможно, в большей степени) структурой физической сетки зацепления. Вероятно, это обстоятельство объясняет тот факт, что величина модуля упругости для образцов покрытий на основе ПДЭГА с УНТ и ППП, имеющих практически одинаковую толщину и температуру стеклования, существенно различаются, кроме того, отсутствует корреляция между температурой стеклования и величиной E .

По той же причине утверждение авторов работы [25] о том, что адгезия льда к покрытию определяется лишь плотностью химических сшивок матрицы является некорректным без указания ее температуры стеклования и толщины покрытия.

Исследования влияния характеристик смачивания поверхности (краевой угол смачивания и гистерезис смачивания) на величину адгезии льда проводили в работах [28–30]. Авторы работы [29] установили, что соотношение между углом оттекания θ_{rec} и величиной адгезии льда к смачиваемой поверхности выражается в виде полуэмпирической зависимости:

$$\tau = (340 \pm 40 \text{ кПа})(1 + \cos \theta_{\text{rec}}). \quad (2)$$

Однако простой расчет по данной формуле, выполненный в работе [25], показал, что данное соотношение может быть использовано лишь в случае «жесткой» высокомодульной подложки и оказывается некорректным для эластичных, например кремнийорганических, покрытий. Причиной является изменение механизма удаления льда [31], что авторы работ [32, 33] связали с реализацией высокоэластических свойств покрытий в процессе отслаивания.

Так, авторы работы [33] предположили, что величина адгезии при отрыве «жесткого» тела от высокоэластичной подложки определяется с экстракцией из объема и распрямлением сегментов полимерных цепей эластомера (рис. 4).

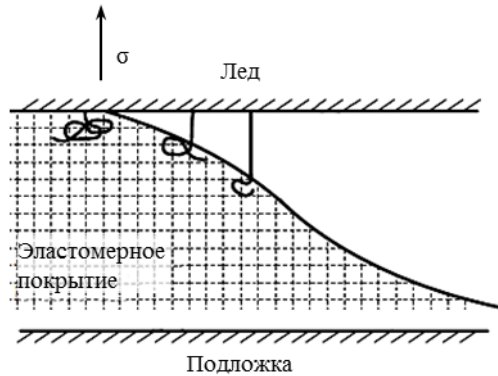


Рис. 4. Механизм влияния высокоэластических свойств эластичного покрытия на адгезию льда в соответствии с работой [24]

В этом случае величина адгезии (σ) будет определяться выражением

$$\sigma = \rho \sqrt{\gamma k T}, \quad (3)$$

где ρ – плотность химических сшивок в эластомере; γ – удельная энергия, необходимая для образования поверхности с площадью a^2 (a – размер сегмента полимерной цепи, $\gamma = kT/a^2$); k – константа Больцмана; T – абсолютная температура.

С учетом того, что величина модуля упругости G связана с плотностью химических сшивок соотношением $G = RT\rho$ (где R – универсальная газовая постоянная), на основании соотношения (2) можно сделать вывод о том, что $\sigma \approx G$.

Другой подход к решению данной задачи продемонстрировали авторы работы [33]. По их мнению, величина адгезии определяется напряжением, при котором происходит изменение формы поверхности эластомерного покрытия в результате развития деформаций сжатия и/или развития эластичной неустойчивости (рис. 5).

В этом случае величина адгезии определяется выражением

$$\sigma = \sqrt{\frac{G \cdot W}{h}}, \quad (4)$$

где W – работа адгезии; G – модуль сдвига; h – толщина покрытия.

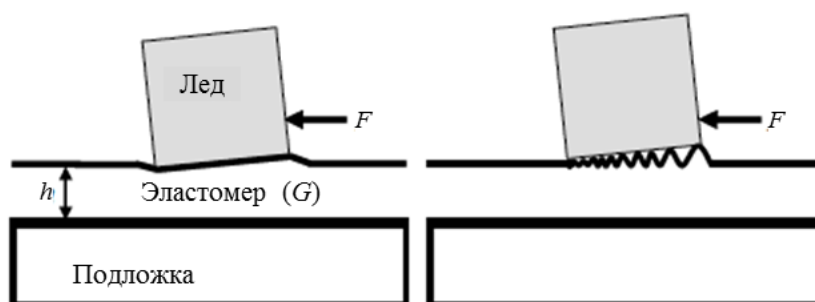


Рис. 5. Механизм влияния деформационной способности полимерного покрытия на адгезию льда в соответствии с данными работы [26]

Поскольку функциональная зависимость $\sigma(G)$, полученная эмпирически, близка к зависимости $\sigma \approx \sqrt{G}$, можно предположить, что отрыв льда от поверхности полимерного покрытия происходит по механизму, который предполагает изменение формы поверхности покрытий при воздействии внешних сдвиговых напряжений.

Таким образом, из представленных экспериментальных данных и теоретических моделей следует, что величина σ определяется не только величиной поверхностной энергии, которая определяет работу адгезии, но и в той же степени эффективным модулем упругости покрытия.

Заключения

В данной работе исследованы адгезионные характеристики льда к покрытиям на основе полиуретанов различных марок – полипропиленгликоля, полибутиленадипината, поликапролактондиола и фторсодержащего олигодиола марки МАОК.

Исследованные покрытия являются гидрофильными. Угол оттекания воды от покрытия изменяется в пределах 15 градусов.

Установлено, что модуль сдвига исследованных покрытий находится в диапазоне значений – от 116 до 297 МПа. Изменение модуля сдвига определяется не только толщиной покрытия и плотностью сетки поперечных химических сшивок, но и структурой физической сетки зацепления.

Определены значения адгезии льда к поверхности исходных и модифицированных углеродными нанотрубками полиуретановых покрытий. Зависимости напряжений, прикладываемых к образцам, от деформации полимерного покрытия имеют нелинейный вид, характерный для всех исследованных систем. Полученные данные, представленные в логарифмических координатах, хорошо аппроксимируются линейной функцией с тангенсом угла наклона, равным 0,51, что свидетельствует о пропорциональной зависимости величины адгезии льда от \sqrt{E} .

На основании научных литературных данных и результатов экспериментов установлено, что величина σ определяется не только величиной поверхностной энергии, которая определяет работу адгезии, но и в той же степени эффективным модулем упругости покрытия.

Именно сочетание этих двух качеств позволит создавать полимерные лакокрасочные покрытия с пониженной адгезией льда и повышенными эксплуатационными характеристиками. С этой точки зрения наиболее перспективными направлениями в разработке таких материалов являются:

– синтез полимерных матриц с оптимальной структурой, которая обеспечивает минимальное значение модуля упругости сдвига при отрицательных температурах;

- использование сегрегирующихся композиций полиуретана с кремнийорганическими соединениями;
- использование в полиуретановых матрицах наполнителя с привитыми функциональными группами, обеспечивающими высокую подвижность проходных цепей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №1 (34) С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Kablov E.N., Kondrashov S.V., Yurkov G.Y. Prospects of using carbonaceous nanoparticles in binders for polymer composites // *Nanotechnologies in Russia*. 2013. Vol. 8. No. 3–4. P. 163–185.
3. Каблов Е.Н. Конструкционные и функциональные материалы – основа экономического и научно-технического развития России // *Вопросы материаловедения*. 2006. №1. С. 64–67.
4. Юрков Г.Ю., Кондрашов С.В., Краев И.Д. Нанокompозиты на основе полиэтилена высокого давления и наночастиц кобальта: синтез, структура и свойства // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. №S2. С. 29–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-S2-29-33.
5. Чайникова А.С., Орлова Л.А., Попович Н.В., Лебедева Ю.Е., Солнцев С.С. Функциональные композиты на основе стекло/стеклокpисталлических матриц и дискретных наполнителей: свойства и области применения (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. №S6. С. 52–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-S6-52-58.
6. Кондрашов С.В., Шашкеев К.А., Петрова Г.Н., Мекалина И.В. Полимерные композиционные материалы конструкционного назначения с функциональными свойствами // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. №S. С. 405–419. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-405-419.
7. Каблов Е.Н., Старцев В.О. Системный анализ влияния климата на механические свойства полимерных композиционных материалов по данным отечественных и зарубежных источников (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2018. №2 (51). С. 47–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-47-58.
8. Кириллов В.Н., Ефимов В.А., Шведкова А.К., Николаев Е.В. Исследование влияния климатических факторов и механического нагружения на структуру и механические свойства ПКМ // *Авиационные материалы и технологии*. 2011. №4. С. 41–45.
9. Laforte J.L., Allaire M.A., Laflamme J. State-of-the-art on power line de-icing // *Atmospheric Research*. 1998. Vol. 46. No. 1–2. P. 143–158.
10. Laakso T., Holttinen H., Ronsten G. et al. Baring-Gould State-of-the-art of wind energy in cold climates // *IEA annex XIX*. 2003. Vol. 24. P. 28–36.
11. Ryerson C.C. Ice protection of offshore platforms // *Cold Regions Science and Technology*. 2011. Vol. 65. No. 1. P. 97–110.
12. Dehghani-Sanij A.R., Dehghani S.R., Naterer G.F., Muzychka Y.S. Marine icing phenomena on vessels and offshore structures: Prediction and analysis // *Ocean Engineering*. 2017. Vol. 143. P. 1–23.
13. Cao Y., Tan W., Wu Z. Aircraft icing: an ongoing threat to aviation safety // *Aerospace Science and Technology*. 2018. Vol. 75. P. 353–383.
14. Wang Y., Xu Y., Huang Q. Progress on ultrasonic guided waves de-icing techniques in improving aviation energy efficiency // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017. Vol. 79. С. 638–645.
15. Jiang W., Huang Y., Sha A. A review of eco-friendly functional road materials // *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 191. P. 1082–1092.
16. Fakorede O., Feger Z., Ibrahim H. et al. Ice protection systems for wind turbines in cold climate: characteristics, comparisons and analysis // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016. Vol. 65. P. 662–675.
17. Kreder M.J., Alvarenga J., Kim P., Aizenberg J. Design of anti-icing surfaces: smooth, textured or slippery? // *Nature Reviews Materials*. 2016. Vol. 1. No. 1. P. 15003.
18. Соловьянич Л.В., Кондрашов С.В., Нагорная В.С., Мельников А.А. Особенности получения антиобледенительных покрытий (обзор) // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.*

2018. №6. (66). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 17.12.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-6-77-98.
19. Liu Y., Ma L., Wang W. et al. An experimental study on soft PDMS materials for aircraft icing mitigation // *Applied Surface Science*. 2018. Vol. 447. P. 599–609.
 20. Yeong Y.H., Milionis A., Loth E., Sokhey J. Self-lubricating icephobic elastomer coating (SLIC) for ultralow ice adhesion with enhanced durability // *Cold Regions Science and Technology*. 2018. Vol. 148. P. 29–37.
 21. Liu J., Wang J., Mazzola L. et al. Development and evaluation of poly (dimethylsiloxane) based composite coatings for icephobic applications // *Surface and Coatings Technology*. 2018. Vol. 349. P. 980–985.
 22. Li H., Li X., Luo C. et al. Icephobicity of polydimethylsiloxane-b-poly (fluorinated acrylate) // *Thin Solid Films*. 2014. Vol. 573. P. 67–73.
 23. Wang H., He G., Tian Q. Effects of nano-fluorocarbon coating on icing // *Applied surface science*. 2012. Vol. 258. No.18. P. 7219–7224.
 24. Li X., Li Y., Ren L., Zhu K. et al. Self-crosslinking coatings of fluorinated polysiloxanes with enhanced icephobicity // *Thin Solid Films*. 2017. Vol. 639. P. 113–122.
 25. Wang Y., Mingzhen J.L., Qingjun L. et al. The icephobicity comparison of polysiloxane modified hydrophobic and superhydrophobic surfaces under condensing environments // *Applied Surface Science*. 2016. Vol. 385. P. 472–480.
 26. Valentini L. Bon S.B., Hernández M. et al. Nitrile butadiene rubber composites reinforced with reduced graphene oxide and carbon nanotubes show superior mechanical, electrical and icephobic properties // *Composites Science and Technology*. 2018. Vol. 166. P. 109–114.
 27. Golovin K., Kobaku S.R.P., Lee D.H. et al. Designing durable icephobic surfaces // *Science Advances*. 2016. Vol. 2. No. 3. P. 1–12.
 28. Santamaria-Echart A., Fernandes I., Saralegi A. et al. Synthesis of waterborne polyurethane-urea dispersions with chain extension step in homogeneous and heterogeneous media // *Journal of Colloid and Interface Science*. 2016. Vol. 476. P. 184–192.
 29. Zou M., Beckford S., Wei R. et al. Effects of surface roughness and energy on ice adhesion strength // *Applied Surface Science*. 2011. Vol. 257. No. 8. P. 3786–3792.
 30. Meuler A.J., Smith J.D., Varanasi K.K. et al. Relationships between water wettability and ice adhesion // *ACS applied materials & interfaces*. 2010. Vol. 2. No. 11. P. 3100–3110.
 31. Bharathidasan T., Kumar S.V., Bobji M.S. et al. Effect of wettability and surface roughness on ice-adhesion strength of hydrophilic, hydrophobic and superhydrophobic surfaces // *Applied Surface Science*. 2014. Vol. 314. P. 241–250.
 32. Léger L., Creton C. Adhesion mechanisms at soft polymer interfaces // *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2008. Vol. 366. No. 1869. P. 1425–1442.
 33. Chaudhury M.K., Kim K.H. Shear-induced adhesive failure of a rigid slab in contact with a thin confined film // *The European Physical Journal E*. 2007. Vol. 23. No. 2. P. 175–183.