

ИНТЕГРАЛЬНАЯ ПРОТИВООБЛЕДЕНИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА С НАГРЕВАТЕЛЬНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ НА ОСНОВЕ ПОЛИСИЛОКСАНОВОЙ КОМПОЗИЦИИ

Данилаев М.П.¹, Дорогов Н.В.¹, Карандашов С.А.¹, Куклин В.А.^{1,2}

¹ Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева – КАИ,
Российская Федерация, 420111, г. Казань, ул. К.Маркса, 10

² Казанский федеральный университет,
Российская Федерация, 420111, г.Казань

Аннотация. Получены характеристики интегральной противообледенительной системы с нагревательным элементом, выполненным на основе полисилоксановой композиции. Показано, что такой нагревательный элемент позволяет обеспечить высокие механические характеристики (стойкость к истиранию, адгезия к углепластику) в широком диапазоне температур $[-50\div 100]^{\circ}\text{C}$. Удельная средняя мощность обогрева такого нагревательного элемента сопоставима с соответствующим значением для нагревательного элемента, выполненного из фторопласта марки Ф-4 CSC 1.2.

Ключевые слова: интегральная противообледенительная система, энергоэффективность, полисилоксановая композиция.

Введение

Расширение условий эксплуатации беспилотных летательных аппаратов, в особенности с большой продолжительностью полета, требует, в том числе, создания высокоэффективных противообледенительных систем [1-4]. В настоящее время предпочтения отдаются различным вариантам тепловых противообледенительных систем (ПОС). Это обусловлено удовлетворительными массогабаритными характеристиками таких ПОС по сравнению с другими типами, например, пневматическими или химическими [4,5]. Сочетания традиционных тепловых ПОС с гидрофобными и супергидрофобными покрытиями позволяет повысить их энергоэффективность [6,7]. Одно из направлений развития современных электротепловых ПОС связано с размещением нагревательных элементов (НЭ) непосредственно на поверхностях элементов, защищаемых от обледенения, путем встраивания их в конструкцию. Такие ПОС получили названия интегральных [8-10]. Следует отметить рост числа публикаций по интегральным ПОС за последние два года более чем на 30% по сравнению с аналогичным предыдущим периодом (по данным базы Scopus). Так, в работах [11,12] обсуждаются конструкции интегральной ПОС, в которых используются супергидрофобное многослойное покрытие с наночастицами диоксида кремния, обеспечивающее высокую гидрофобность, стойкость к истиранию и хорошую ремонтопригодность. Последнее достигается тем, что покрытие наносится на поверхность методом напыления. Однако, оценка энергоэффективности такой ПОС не приводится. В работе [10] рассмотрена оригинальная конструкция многослойной пленочной интегральной ПОС с различными функциональными свойствами слоев. Несмотря на высокую энергоэффективность для подобной конструкции ПОС характерна низкая ремонтопригодность.

Анализ литературных данных, например, [3,4,11-15] показывает, что перспективной основой НЭ интегральных ПОС являются полисилоксановые композиции, представляющие собой полимерную матрицу, на основе наночастиц диоксида кремния. Использование функциональных групп позволяет повысить гидрофобность таких покрытий с одновременным увеличением адгезии к субстрату [14]. Причем функциональные группы, придающие материалу НЭ гидрофобность, возможно ориентировать к поверхности элемента конструкции ЛА, а функциональные группы, способствующие повышению адгезии – к подложке [15]. В большей части работ по интегральным ПОС, выполненным на основе полисилоксановых композиций, подробно изучается структура покрытия, а экспериментальные оценки энергоэффективности не приводятся. Теоретические расчеты энергоэффективности электротепловых ПОС [16,17] обычно проводят в пределах ограничений, не учитывающих, например, турбулентность потока вблизи аэродинамического профиля или течения в пограничной области. Поэтому результаты таких расчетов отличаются от экспериментальных данных, являющихся более адекватными реальным условиям эксплуатации. Следует также отметить, что энергоэффективность интегральных ПОС определяется не только качеством и свойствами материала покрытия, но и режимом работы нагревательных элементов. Так, например, в работе [18] показано, что за счет выбора квазиоптимальных значений скважности, длительности и амплитуды импульсов нагрева энергоэффективность возможно повысить на ~20% по сравнению с существующими ПОС при использовании в качестве нагревательных элементов проводящего фторопласта марки Ф-4 CSC 1.2. Цель данной работы состоит в определении эффективности интегральной противообледенительной системы, нагревательные элементы которой выполнены на основе функционализированной полисилоксановой композиции.

Методика исследований

Основой полисилоксановой композиции нагревательных элементов являлся кремнийорганический лак и два типа функциональных групп (чего-то?). Первый тип функциональных групп [3] способствовал повышению гидрофобности поверхности НЭ, второй тип – повышению адгезии покрытия к поверхности элементов конструкции ЛА (рис.1). Кремнийорганическую основу лака получали реакцией гидролиза метилтриметоксисилана в кислой среде при $\text{pH } 3\div 4$ [14]. Синтезированный лак содержал смесь линейных $\text{CH}_3[\text{Si}(\text{CH}_3)(\text{OCH}_3)]_n\text{OCH}_3$ и циклических $[\text{Si}(\text{CH}_3)(\text{OCH}_3)\text{O}]_m$ метилметоксиполисилоксанов, и функциональные винил и октильные группы. При синтезе в лак добавляли 5% по массе октилтриметоксисилана и 5% по массе винилтриэтоксисилана для улучшения его физико-механических свойств и адгезии к субстрату. Дополнительно к составу кремнийорганического лака, синтезированного по разработанной технологии [19], добавляли пропиленгликоль для снижения скорости испарения смеси растворителей. Это способствовало получению хорошо сшитой структуры, обеспечивающей высокую стойкость к истиранию. Для достижения проводимости создавали полисилоксановую композицию с проводящими частицами графита. На лабораторном диссольвере DISPERMAT LC30 при 3000 об/мин в среде синтезированного кремнийорганического лака производили диспергирование графитовых частиц до 5 мкм по прибору «Клин». Концентрация графитовых частиц по массе составляла 20%, что обеспечивало удельное сопротивление $\sim (1\pm 0.1)\text{кОм}\cdot\text{м}$, близкое к удельному сопротивлению проводящего фторопласта марки Ф-4 CSC 1.2 [18]. Схема синтеза лаковой композиции на поверхности аэродинамического профиля представлена на рисунке1.

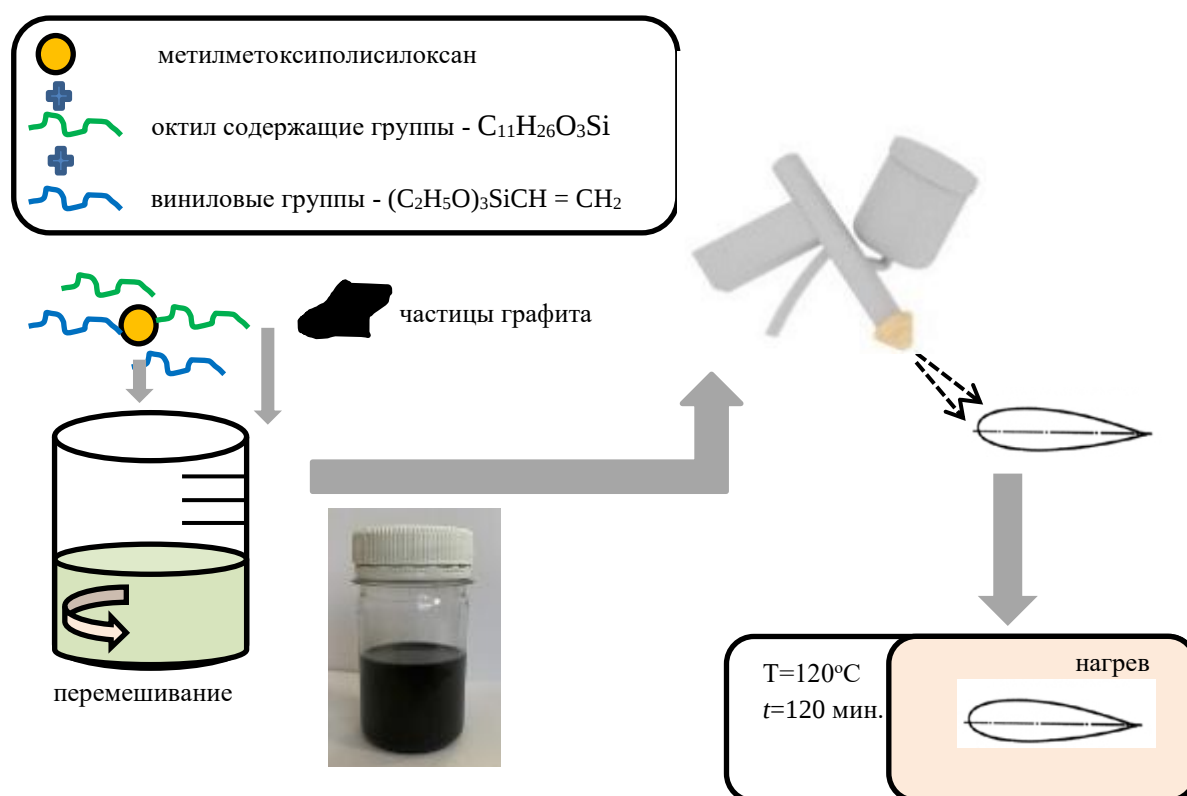


Рис.1. Схема синтеза лаковой композиции на поверхности аэродинамического профиля.

В качестве аэродинамического профиля использовался элемент хвостового оперения самолета-мишени «Дань М», выполненный из углепластика. Полисилоксановая композиция на поверхность аэродинамического профиля наносилась методом напыления в два этапа. На первом этапе наносилась основа полисилоксановой композиции, не содержащая проводящих частиц и функциональных групп, придающих гидрофобность поверхности. Это обеспечивало электрическую изоляцию от электропроводящего элемента конструкции. Поверх этого слоя, через трафарет, наносилась полисилоксановая композиция с проводящими частицами (второй слой НЭ). После чего аэродинамический профиль с нагревательным элементом, выполненным таким образом, выдерживался в термошкафу в течение 120 ± 10 мин при температуре $120 \pm 5^{\circ}C$ с последующим естественным остыванием до комнатной температуры ($22 \pm 3^{\circ}C$). Подведение напряжения к нагревательному элементу осуществлялось путем размещения медной фольги между первым и вторым слоями НЭ.

Экспериментальные исследования по оценке энергоэффективности рассматриваемой интегральной ПОС проводились на стенде, описанном в работах [3,8], в диапазоне температур $(-10 \div 0) \pm 0.5^{\circ}C$, близком к условиям наиболее интенсивного образования наледи [20]. Экспериментальные исследования проводились в диапазоне температур $(-10 \div 0)^{\circ}C$, близком к условиям наиболее интенсивного образования наледи [20]. В экспериментах число Рейнольдса составляло $\sim 5 \cdot 10^4$, водность набегающего потока $-0.3 \pm 0.05 \text{ г/м}^3$, температура воды в эжекторе $-(1 \pm 0.5)^{\circ}C$. Контроль температуры воздушного потока осуществлялся с использованием терморезисторов (HEL-712) в двух точках: на поверхности аэродинамического профиля и на расстоянии 20 мм от стенки камеры [3,18]. Погрешность измерения температуры составляла $\pm 0.1^{\circ}C$. Питание нагревательных элементов осуществлялось от источника постоянного тока мощностью 0,5 кВт.

Оценка энергоэффективности интегральной ПОС проводилась в режиме удаления наледи. При появлении наледи на поверхности нагревательного элемента при его работе в пассивном режиме (нагрев не осуществляется) показания датчика температуры возрастали [3]. Это являлось сигналом для включения нагрева НЭ. Температура, до которой осуществлялся нагрев, задавалась в экспериментах в диапазоне $[1 \div 5] \pm 0.1^\circ\text{C}$ с шагом $1 \pm 0.1^\circ\text{C}$. Таким образом, циклограмма напряжения на нагревательном элементе формировалась по сигналу управления с датчика температуры. Обработка сигнала с датчика температуры с учетом шумов и флуктуаций, а также скорости и температуры набегающего воздушного потока, осуществлялась в микроконтроллере Atmega 8 [14]. Для регистрации мощности, потребляемой нагревательными элементами, использовали амперметр и вольтметр 1-го класса точности.

Результаты экспериментов и их обсуждение

В первой серии экспериментов проводились исследования физических свойств полисилоксановой композиции, являющейся основой НЭ: адгезия полисилоксановой композиции к подложке, стойкость к истиранию, твердость покрытия и его гидрофобность.

Исследование адгезии полисилоксанового покрытия проводили в диапазоне температур $[-50 \div 100] \pm 5^\circ\text{C}$ [21] методом решетчатого надреза по ГОСТ 31149-2014. Перед проведением испытаний образец с покрытием выдерживали в климатической камере не менее 120 ± 10 мин. Перед проведением испытаний на адгезию образцы остужали до комнатной температуры $(22 \pm 3)^\circ\text{C}$ естественным образом. Твердость покрытия оценивали с помощью маятникового твердомера МТ1 по ГОСТ Р 52166-2003 после соответствующих температурных воздействий на образцы. Типовые результаты испытаний представлены в табл.1.

Таблица 1.

Результаты испытания адгезии

Температура, $^\circ\text{C}$ ($\pm 5^\circ\text{C}$)	-45	-20	0	40	100
Стойкость к истиранию после воздействия низкой температуры, баллы	2	1	0	0	1
Твердость покрытия по стеклу	0.9	0.9	0.9	0.8	0.88

Испытания покрытия показали, что среднее значение адгезионной стойкости полисилоксанового покрытия к углепластику не хуже 1 балла, что соответствуют лишь незначительным отслоениям краев надрезов [22].

Испытания на абразивную стойкость проводились по ОСТ 3-1901-85 на приборе типа СМ-65 путем анализа защищенной поверхности образца после его трения о батиловую ткань, вращающуюся на диске с частотой 3000 об/мин при нагрузке на образец 200 гр [3]. В соответствии с ОСТ 3-190-85 полисилоксановое покрытие относится к группе прочности – 0. Гидрофобность образцов полисилоксанового покрытия оценивали с помощью сравнения угла краевого смачивания на приборе Катетометре КМ-8 с

погрешностью не более 10%. Средние значения угла краевого смачивания по результатам не менее 10 независимых измерений составили $92 \pm 3^\circ$.

Таким образом, добавление винильных и октил содержащих групп обеспечивает удовлетворительную, хотя и меньшую гидрофобность полисилоксанового покрытия по сравнению с результатами, полученными в работах [11,12,15]. По всей видимости, это обусловлено использованием наполнителя графита, который приводит к изменению морфологии поверхности (увеличению шероховатости, рис.2), в отличие от наночастиц, использовавшихся в качестве наполнителя, например, в работе [15]. Одновременно с гидрофобностью обеспечена высокая адгезия к подложке в большом диапазоне температур и стойкости к истиранию.

Во второй серии экспериментов определялась энергоэффективность макета интегральной противообледенительной системы. Среднее значение интенсивности (скорости) образования наледи ($\bar{V}$) на полисилоксановом покрытии и нагревательном элементе (табл.2) определялось при выключенном нагреве по методике, приведенной в работе [3]; $\bar{V}_0$ – интенсивности образования наледи на элементе конструкции аэродинамического профиля, незащищенного интегральной ПОС.

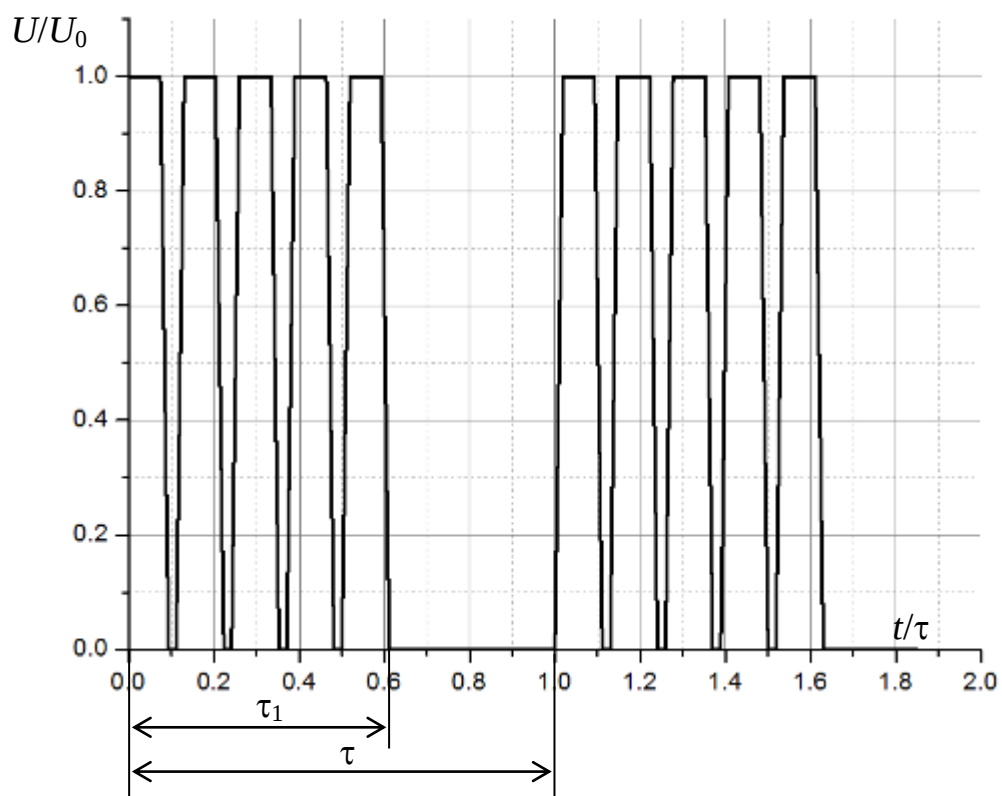
Таблица 2.

Приведенное среднее значение интенсивности обледенения

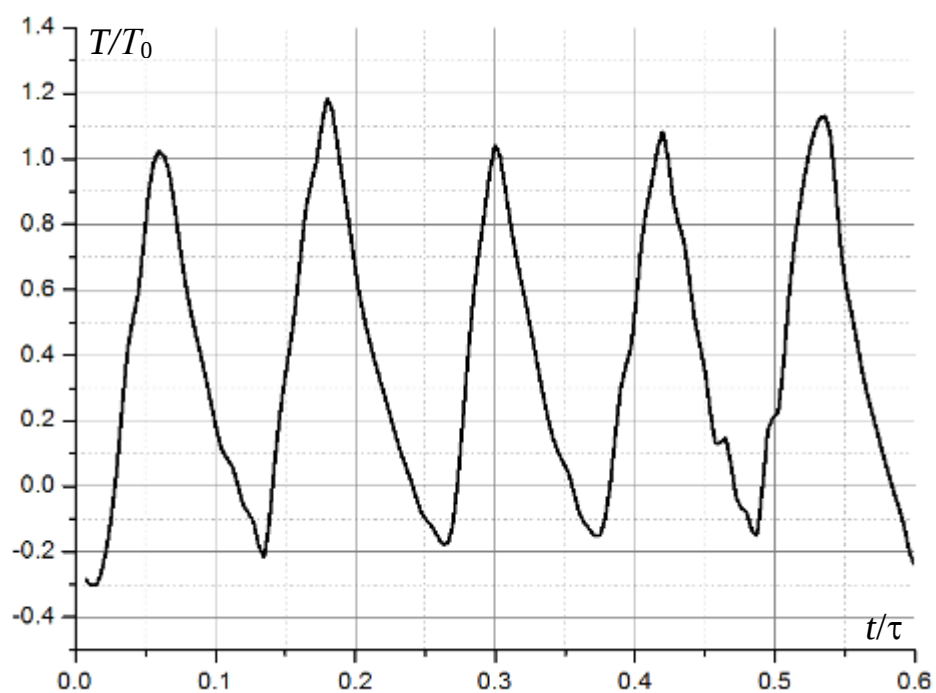
	$T_0 = (-10 \pm 0.5)^\circ \text{C}$	$T_0 = (-7 \pm 1)^\circ \text{C}$	$T_0 = (-3 \pm 0.5)^\circ \text{C}$	$T_0 = (-0.5 \pm 0.3)^\circ \text{C}$
$\frac{\bar{V}}{V_0}$	0.8 ± 0.05	0.75 ± 0.05	0.5 ± 0.05	0.25 ± 0.05
$\bar{V}_0$, мм/мин	2 ± 0.5	1.7 ± 0.5	1.2 ± 0.5	1.2 ± 0.5

Полученное в экспериментах значение $\bar{V}$, оказалось близким к соответствующему значению для фторопластовых противообледенительных покрытий [3,18], которые, однако, не стойки к истиранию.

Типовые циклограммы для установившегося режима представлены на рисунке 2 для подводимой к НЭ средней электрической мощности ~ 17 Вт, напряжение питания нагревательного элемента $U_0 = 60$ В, период следования пачки импульсов нагрева $\tau = 540$ с, температура окружающей среды $T_{\text{среды}} = -8^\circ \text{C}$, температура до которой осуществлялся нагрев НЭ $T_0 = 5^\circ \text{C}$.



а)



б)

Рис. 2. Типовые циклограммы включения и выключения нагревательного элемента: (а) зависимость нормированного напряжения питания нагревательного элемента от времени; (б) зависимость нормированной температуры на поверхности нагревательного элемента от времени.

В экспериментах время нагрева τ_1 определялось по удалению наледи с кромки аэродинамического профиля, что фиксировалось визуально, а период следования пачек

импульсов нагрева – образованием наледи за время $(\tau - \tau_1)$, которое определялось по методике, предложенной в [3].

Экспериментальные результаты энерговклада в нагрев НЭ при различных температурах окружающей среды и $T_0 = 5^\circ\text{C}$, приведены в таблице 3, $q = \tau / \tau_1$ – скважность пачек импульсов нагрева НЭ, $W_{\text{уд}}$ – удельная средняя мощность обогрева (Вт/см²).

Таблица 3.

Экспериментальные результаты управления НЭ ИПОС

	$T_0 = (-10 \pm 0.5)^\circ\text{C}$	$T_0 = (-7 \pm 1)^\circ\text{C}$	$T_0 = (-3 \pm 0.5)^\circ\text{C}$	$T_0 = (-0.5 \pm 0.3)^\circ\text{C}$
$W_{\text{уд}}, \text{Вт/см}^2$	$22 \cdot 10^{-3}$	$15 \cdot 10^{-3}$	$7 \cdot 10^{-3}$	$3.5 \cdot 10^{-3}$
q	1.3	1.6	1.8	2

Удельная средняя мощность обогрева НЭ из фторопласта марки Ф-4 CSC 1.2 при температуре воздуха $T_0 = -3^\circ\text{C}$ в режиме предотвращения образования наледи составляла $W_{\text{уд}0} = 7 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/см}^2$ по данным, приведенным в [18]. В режиме удаления наледи с учетом импульсного характера нагрева, удельная средняя мощность обогрева НЭ из такого фторопласта будет существенно ниже. Так, при скважности пачек импульсов $q=1.8$ соответствующей НЭ, выполненному из полисилоксановой композиции (табл.3), удельная средняя мощность обогрева для НЭ из фторопласта составит $W_{\text{уд}0} \sim 3 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/см}^2$. Следует отметить, что скважность q зависит, в том числе, от допустимой толщины льда и геометрией аэродинамического профиля.

Заключение

Проведенные исследования показывают, что нагревательный элемент, выполненный на основе полисилоксановой композиции, позволяет обеспечить высокую стойкость к истиранию, а также высокую адгезию к углепластику в достаточно широком диапазоне температур $[-50 \div 100]^\circ\text{C}$. Недостаточно высокая гидрофобность поверхности такого НЭ по сравнению с аналогичными, объясняется применением частиц наполнителя (графит) микронного размера, что приводит к высокому значению шероховатости поверхности. Высокая шероховатость поверхности способствует повышению сцепления льда с поверхностью нагревательного элемента [23]. Удельная средняя мощность обогрева такого НЭ сопоставима по порядку величины с соответствующим значением для НЭ, выполненного из фторопласта марки Ф-4 CSC 1.2 (Италия). Таким образом, нагревательный элемент на основе полисилоксановой композиции, используемый в интегральной ПОС, может быть рекомендован к применению в малой и сверхмалой авиации, в том числе и беспилотных ЛА.

Источники финансирования, благодарности

Научные исследования проведены при финансовой поддержке Минобрнауки России Рег. номер НИОКТР АААА-А20-120102190039-6, а также при частичной поддержке, в части синтеза полисилоксановой композиции, программы стратегического лидерства «Приоритет – 2030».

Список литературы

1. Hann R., Enache A., Nielsen M.C., Stovner B.N., Beeck J.V., Johansen T.A., Borup K.T. Experimental Heat Loads for Electrothermal Anti-Icing and De-Icing on UAVs //Aerospace. – 2021. – Т. 8. – №. 3. – С. 83.
2. Hann R., Enache A., Nielsen M.C., Stovner B.N., van Beeck J., Johansen T.A., Borup K.T. UAV Icing: Experimental Heat Loads for Anti-Icing and De-Icing //AIAA AVIATION 2020 FORUM. – 2020. – С. 2833.
3. Danilaev M.P., Bogoslov E.A., Dorogov N.V., Klabukov M.A., Bobina E.A. Icing intensity of passive organosilicon anti-icing coatings // Russian aeronautics. 2019. т. 62. № 1. с. 129-133.
4. Hovenburg A. R. Flight Performance Optimization for Small Unmanned Aerial Vehicles Using Path Planning Methods. – 2020.
5. Hann R., Johansen T. A. Unsettled Topics in Unmanned Aerial Vehicle Icing. – SAE Technical Paper. – 2020. – №. EPR2020008.
6. Wu B. et al. A superhydrophobic coating harvesting mechanical robustness, passive anti-icing and active de-icing performances //Journal of Colloid and Interface Science. – 2021. – Т. 590. – С. 301-310.
7. Li W., Zhan Y., Yu S. Applications of superhydrophobic coatings in anti-icing: Theory, mechanisms, impact factors, challenges and perspectives //Progress in Organic Coatings. – 2021. – Т. 152. – С. 106117.
8. Богослов Е.А., Данилаев М.П., Михайлов С.А., Польский Ю.Е. Энергетическая эффективность интегральной противообледенительной системы на основе фторопластовых пленок // Инженерно-физический журнал. - 2016.- Т.89. №4. С.812-817
9. Idris M.K., Qiu J., Melenka G.W., Grau G. Printing electronics directly onto carbon fiber composites: unmanned aerial vehicle (UAV) wings with integrated heater for de-icing //Engineering Research Express. – 2020. – Т. 2. – №. 2. – С. 025022.
10. Zhao Z., Chen H., Liu X., Wang Z., Zhu Y., Zhou Y. Novel sandwich structural electric heating coating for anti-icing/de-icing on complex surfaces //Surface and Coatings Technology. – 2020. – Т. 404. – С. 126489.
11. Piscitelli F., Chiariello A., Dabkowski D., Corrado G., Marra F., Palma L.D. Superhydrophobic coatings as anti-icing systems for small aircraft //Aerospace. – 2020. – Т. 7. – №. 1. – С. 2.
12. Piscitelli F., Tescione F., Mazzola L., Bruno G., Lavorgna M. On a simplified method to produce hydrophobic coatings for aeronautical applications //Applied Surface Science. – 2019. – Т. 472. – С. 71-81.
13. Arianpour F., Farzaneh M., Kulinich S.A. Hydrophobic and ice-retarding properties of doped silicone rubber coatings// Applied Surface Science. – 2013. – 265: 546-552.
14. Данилаев М. П., Карандашов С. А. Полисилоксановая композиция для нагревательных элементов интегральной противо-обледенительной системы //Научно-технический вестник Поволжья. – 2020. – №. 12. – С. 97-100.
15. Rahimi A., Murphy M., Upadhyay V., Faiyaz K., Battocchi D., Webster D.C. Amphiphilically modified self-stratified siloxane-glycidyl carbamate coatings for anti-icing applications //Journal of Coatings Technology and Research. – 2021. – Т. 18. – №. 1. – С. 83-97.
16. Jung S., Raj L. P., Rahimi A., Jeong H., Myong R. S. Performance evaluation of electrothermal anti-icing systems for a rotorcraft engine air intake using a meta model //Aerospace Science and Technology. – 2020. – Т. 106. – С. 106174.
17. Shen X., Guo Q., Lin G., Zeng Y., Hu Z. Study on loose-coupling methods for aircraft thermal anti-Icing system //Energies. – 2020. – Т. 13. – №. 6. – С. 1463.

18. Данилаев М.П., Дорогов Н.В., Куклин В.А., Бобина Е.А. Эффективность интегральной противообледенительной системы в режиме удаления наледи при циклическом управлении нагревательным элементом // Научно-технический вестник Поволжья. – 2020. – № 9. – С. 23-27.

19. Пат 2745600 Российской Федерации, МПК7 В32В 27/30 Способ формирования защитного покрытия на прозрачном монолитном поликарбонате// Самсонов В.И., Силкин А.Н., Хмельницкий А.К., Данилаев М.П., Михайлов С.А.; заявитель и патентообладатель: АО ОНПП «Технология» им.А.Г.Ромашина; заявл. 22.07.2020; опубл. 29.03.2021. – Бюл.№10.

20. Shinkafi A., Lawson C. Enhanced Method of Conceptual Sizing of Aircraft Electro-Thermal De-icing System. International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial and Mechatronics Engineering. – 2014. – Vol.8. – No.6. – Pp.1069-1076.

21. Корнеев В. Особенности конструкции и эксплуатации беспилотных летательных аппаратов самолетного типа. – Litres, 2019.

22. ГОСТ 31149-2014. Определение адгезии методом решетчатого надреза [Текст]. – М.: Стандартиформ. – 2014. – 22 с.

23. Zou M. Beckford S., Wei R., Ellis C., Hatton G., Miller M. A.. Effects of surface roughness and energy on ice adhesion strength //Applied Surface Science. – 2011. – Т. 257. – №. 8. – С. 3786-3792.

INTEGRAL ANTI-ICE SYSTEM WITH HEATING ELEMENTS BASED ON POLYSILOXANE COMPOSITION

Danilev M.P.¹, Dorogov N.V.¹, Karandashov S.A.¹, Kuklin V.A.^{1,2}

¹Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI
Kazan, 420111, Russian Federation

²Kazan (Volga region) Federal University
Kazan, 420008, Russian Federation

Abstract: The characteristics of an integral anti-icing system with a heating element made on the basis of a polysiloxane composition are considered in this paper. It is shown that the heating element from polysiloxane composition has the high mechanical properties (abrasion resistance, adhesion to carbon fiber) in a wide temperature range [-50÷100]°C. The experimental results are showing that the average heating power of such a heating element is comparable to the corresponding value of the heating element from F-4 CSC 1.2 fluoroplast.

Key words: integrated anti-icing system, energy efficiency, polysiloxane composition.

Статья поступила в редакцию 16.02.2022 г.