

Паньков А.А., Писарев П.В. Антиобледенительное индикаторное полимерное покрытие со встроенным оптоволоконным PEL-датчиком для индикации, локации и очистки от обледенения аэродинамических поверхностей // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2021. – № 4. – С. 111–121. DOI: 10.15593/perm.mech/2021.4.11

Pan'kov A.A., Pisarev P.V. Anti-icing indicator polymer coating with built-in fiber-optic PEL-sensor for indication, location and de-icing of aerodynamic surfaces. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2021, no. 4, pp. 111-121. DOI: 10.15593/perm.mech/2021.4.11



ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА

№ 4, 2021

PNRPU MECHANICS BULLETIN

<https://ered.pstu.ru/index.php/mechanics/index>



DOI: 10.15593/perm.mech/2021.4.11

УДК 539.3; 531.787.5

## АНТИОБЛЕДЕНИТЕЛЬНОЕ ИНДИКАТОРНОЕ ПОЛИМЕРНОЕ ПОКРЫТИЕ СО ВСТРОЕННЫМ ОПТОВОЛОКОННЫМ PEL-ДАТЧИКОМ ДЛЯ ИНДИКАЦИИ, ЛОКАЦИИ И ОЧИСТКИ ОТ ОБЛЕДЕНЕНИЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

А.А. Паньков, П.В. Писарев

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

### О СТАТЬЕ

Получена: 1 марта 2021 г.  
Принята: 10 сентября 2021 г.  
Опубликована: 30 декабря 2021 г.

#### Ключевые слова:

индикаторное полимерное покрытие, антиобледенительное покрытие, встроенный оптоволоконный датчик, пьезоэффект, электролюминесценция, численное моделирование.

### АННОТАЦИЯ

Разработана математическая модель и дан численный модальный анализ антиобледенительного режима функционирования нового индикаторного полимерного покрытия со встроенным оптоволоконным пьезоэлектролюминесцентным (PEL) датчиком для индикации, локации и самоочистки от обледенения аэродинамических поверхностей. Оптоволоконный PEL-датчик расположен в плоскости покрытия, при этом на выходе из оптоволоконного датчика установлен приемник-анализатор информативных интегральных интенсивностей световых сигналов и к выходам двух управляющих электродов датчика подключен генератор переменного электрического напряжения. Антиобледенительная функция полимерного покрытия осуществляется в автоматическом режиме посредством термомеханического актюаторного воздействия PEL-датчика на присоединенный к поверхности покрытия слой (корку) льда и лишь на тех локальных участках покрытия, где толщина присоединенного слоя льда достигла заданного критического значения. Контроль качества очистки от обледенения поверхности антиобледенительного покрытия осуществляется по алгоритмам цифровой обработки информативных световых сигналов на выходе из оптического волокна PEL-датчика. В результате достигается повышение эффективности и контроль удаления обледенения на аэродинамических поверхностях, особенно для протяженных поверхностей; энергоэффективность антиобледенительного полимерного покрытия повышается из-за локальности и самоконтроля процесса очистки от обледенения. Модальный анализ осуществлен в пакете конечно-элементного анализа ANSYS на основе численного решения связанной краевой задачи электроупругости об установившихся вынужденных электромеханических колебаниях представительной ячейки антиобледенительного индикаторного полимерного покрытия. Представлены результаты расчета собственных частот и форм колебаний представительной ячейки антиобледенительного покрытия, амплитудно-частотные характеристики механических напряжений на границе «покрытие/лед» для различных значений толщины присоединенного слоя льда для случая действия вынуждающей гармонической «силы» в виде управляющего электрического напряжения на электродах встроенного PEL-датчика.

© ПНИПУ

© Паньков Андрей Анатольевич – д-р ф.-м. н., доц., проф., e-mail: [a\\_a\\_pankov@mail.ru](mailto:a_a_pankov@mail.ru), iD: 0000-0001-8477-5206.  
Писарев Павел Викторович – к.т.н., доц., e-mail: [pisarev@pstu.ru](mailto:pisarev@pstu.ru), iD: 0000-0001-5103-4815.

Andrey A. Pan'kov – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Docent, e-mail: [a\\_a\\_pankov@mail.ru](mailto:a_a_pankov@mail.ru), iD: 0000-0001-8477-5206.

Pavel V. Pisarev – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: [pisarev@pstu.ru](mailto:pisarev@pstu.ru), iD: 0000-0001-5103-4815.



Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

## ANTI-ICING INDICATOR POLYMER COATING WITH BUILT-IN FIBER-OPTIC PEL-SENSOR FOR INDICATION, LOCATION AND DE-ICING OF AERODYNAMIC SURFACES

A.A. Pan'kov, P.V. Pisarev

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

### ARTICLE INFO

Received: 01 March 2021  
Accepted: 10 September 2021  
Published: 30 December 2021

#### Keywords:

indicator polymer coating, anti-icing coating, built-in fiber optic sensor, piezoeffect, electroluminescence, numerical modeling.

### ABSTRACT

A mathematical model was developed and a numerical modal analysis of the anti-icing mode of operation of the new indicator polymer coating with an integrated optical fiber piezoelectroluminescent (PEL) sensor for icing indication, location and self-cleaning from icing of aerodynamic surfaces was given. The fiber optic PEL-sensor is located in the plane of the coating. Receiver-analyzer of informative integral intensities of light signals is installed at output from optical fiber of sensor. Alternating voltage generator is connected to outputs of two control electrodes of sensor. The anti-icing function of the polymer coating is carried out automatically by thermo-mechanical actuation of the PEL-sensor on the appeared ice layer (on the ice crust of the coating) and only in those local areas of the coating where the thickness of the attached ice layer has reached a given critical value. Quality of cleaning from icing of surface of anti-icing coating is controlled by algorithms of digital processing of informative light signals at output from optical fiber of PEL-sensor. As a result, improved efficiency and control of de-icing on aerodynamic surfaces is achieved, especially for extended surfaces. The energy efficiency of the anti-icing polymer coating is increased due to the locality and self-control of the icing process. The modal analysis was carried out in an ANSYS finite element analysis package based on a numerical solution of the electrical-elasticity boundary value problem of stationary electromechanical oscillations of the representative cell of the anti-icing indicator polymer coating in the absence and presence of an ice layer of different thickness. Results of calculation of natural frequencies and forms of oscillations of representative cell of anti-icing coating, amplitude-frequency characteristics of mechanical stresses at coating/ice boundary for different values of thickness of attached ice layer for case of action of harmonic "force" in form of control electric voltage on electrodes of built-in PEL-sensor are presented.

© PNRPU

### Введение

Обледенение аэродинамических поверхностей элементов конструкций авиационной техники: крыльев, лопастей воздушных винтов, воздухозаборников, обтекателей антенн, остеклений фонарей и датчиков пилотажно-навигационных приборов самолетов и вертолетов [1, 2], лопастей ротора ветровых турбин [3, 4] оказывает критическое влияние на их эксплуатационные характеристики, в частности: приводит к увеличению аэродинамического сопротивления, значительному снижению подъемной силы и падению скорости полета, ухудшению устойчивости и управляемости летательного аппарата, что обуславливает необходимость применения специальных гидрофобных материалов [5–10] и актуальность совершенствования противообледенительных систем и покрытий [11, 12]. Физические аспекты процесса охлаждения и замерзания капель воды на поверхностях различных гидрофобных полимерных материалов исследованы в [13] с использованием видеозаписи в длинноволновом инфракрасном диапазоне. В работах [14–21] проведены исследования адгезионной прочности сцепления льда с поверхностями полимерных гидрофобных покрытий, в частности модифицированных углеродными наночастицами [18–21] в зависимости от смачиваемости и шероховатости поверхности.

Противообледенительные системы аэродинамических поверхностей состоят из подсистем индикации и

диагностирования локаций, степени обледенения и очистки (механической, физико-химической, тепловой) от обледенения [1]. Широко применяются вибрационные системы индикации (сигнализаторы) обледенения, в которых регистрируют изменения собственной частоты колебаний чувствительного элемента при увеличении его массы из-за нароста на нем слоя льда. Удаление обледенения с аэродинамических поверхностей механическим способом осуществляется в результате силового воздействия на лед до его разрушения и удаления обломков льда набегающим воздушным потоком; в физико-химическом способе используются специальные жидкости для понижения температуры замерзания переохлажденных капель воды или уменьшения силы сцепления льда с поверхностью (обшивкой); в тепловом способе применяется нагрев защищаемой поверхности до температуры таяния льда. Механические противообледенительные системы обычно работают в циклическом режиме, когда система не реагирует на образование льда допустимой толщины (4–5 мм), а при превышении этих значений система разрушает лед, и его обломки удаляются под воздействием набегающего потока. Активные системы мониторинга состояния аэродинамической поверхности крыльев самолета, лопастей ротора ветровых турбин и вертолета рассмотрены в [4]. Здесь [4] система мониторинга изготавливалась методом 3D-печати непосредственно на неплоской поверхности контролируемого объекта и предназначалась для

обнаружения обледенения и удаления льда с контролируемой поверхности; обледенение обнаруживалось с использованием емкостного датчика и матрицы датчиков термопар; в случае обледенения нагреватель удалял критическое отложение льда. Антиобледенительное полимерное покрытие [22] содержит сеть из емкостных датчиков и проводящих резистивных нагревательных элементов (для теплового удаления обледенения), интегрированную в изоляционный материал гибкой подложки; сеть подсоединена к приборной доске в кабине экипажа для отображения рабочих параметров и управления покрытием. Антиобледенительное полимерное покрытие [23] наносят на аэродинамическую поверхность конструкции, при этом связующая полимерная матрица покрытия содержит один или более пьезоэлектрических элементов для создания управляемых вибраций наружной поверхности покрытия в силу воздействия на пьезоэлектрические элементы электрического поля от внешнего источника электроэнергии. При этом вибрация не должна приводить к повреждениям антиобледенительного покрытия и конструкции в целом. Пьезоэлектрический элемент или элементы могут быть равномерно распределены по всей связующей матрице антиобледенительного покрытия и/или непосредственно и независимо подключены к источнику электроэнергии. В качестве материала связующей матрицы антиобледенительного покрытия выбраны полиуретановые или фторполиуретановые краски, смолы или пластмассы, содержащие тефлон. Толщина антиобледенительного покрытия составляет от 20 до 100 мкм. Антиобледенительное покрытие позволяет добиться того, что максимальная толщина слоя льда, нарастающего на его наружной поверхности, не превышает 2 мм с учетом плохого сцепления антиобледенительного покрытия со льдом, в результате чего для разрушения образовавшегося ледяного слоя требуется меньше энергии, чем это обычно необходимо. Вследствие тонкости слоя льда его разрушение и отделение от поверхности покрытия происходит в форме небольших частиц толщиной около 2 мм, не представляющих опасности для турбореактивного двигателя. Дополнительный защитный слой может также содержать составы, отличные от антиобледенительного покрытия, например, углерод, стекло или любой другой материал, способный повысить стойкость покрытия к износу или удару.

Перспективным решением проблемы обледенения аэродинамических поверхностей является разработка и создание новых многофункциональных индикаторных оптоволоконных пьезоэлектродлюминесцентных (PEL) полимерных покрытий [24–27] для обнаружения, локализации и диагностирования ударных механических воздействий, повреждений и обледенения, диагностики и гашения вибраций поверхности высоконагруженных элементов авиационных конструкций. Такие индикаторные полимерные покрытия осуществляют функции индикации и уточненной диагностики внешних механических воздействий (в том числе обледенения) посредством

встроенных в них оптоволоконных PEL-датчиков, расположенных в плоскости покрытия прямолинейно или в виде спирали с установленным на выходе из оптоволоконного PEL-датчика приемником-анализатором интегральных интенсивностей моно- или полихромных световых сигналов, а антиобледенительные функции осуществляют посредством термомеханического актуаторного воздействия индикаторного полимерного покрытия на слой (корку) льда, присоединившийся к поверхности покрытия. В частности, в [27] предложен способ защиты поверхностей конструкций от присоединенных частиц и осадочных наслоений в виде пыли, воды, инея, льда с использованием индикаторного полимерного покрытия со встроенным оптоволоконным PEL-датчиком с целью индикации, локализации и удаления (в автоматическом режиме) частиц и наслоений (обледенения), контроля качества очистки протяженных участков поверхностей. Защитное полимерное покрытие может быть использовано в транспортной и нефтегазовой промышленности, в аэрокосмической технике для защиты от обледенения аэродинамических поверхностей авиационных конструкций.

Цель исследования – разработка математической модели и численный анализ динамических характеристик антиобледенительного режима функционирования индикаторного полимерного покрытия со встроенным оптоволоконным PEL-датчиком для индикации, локализации и очистки от обледенения аэродинамических поверхностей.

## 1. Математическая модель антиобледенительного индикаторного полимерного покрытия со встроенным PEL-датчиком

Встроенный в антиобледенительное полимерное покрытие PEL-датчик (рис. 1) представляет собой оптоволоконно 1 с коаксиальными электродлюминесцентным 2 и пьезоэлектрическим 3 слоями (оболочками); оптоволоконно и электродлюминесцентный (EL) слой разделены внутренним светопрозрачным (или перфорированным) управляющим электродом 4, на поверхности пьезоэлектрического слоя 3 расположен внешний управляющий электрод 5, при этом пьезоэлектрический слой 3 имеет радиальную поляризацию. Управляющие электроды 4, 5

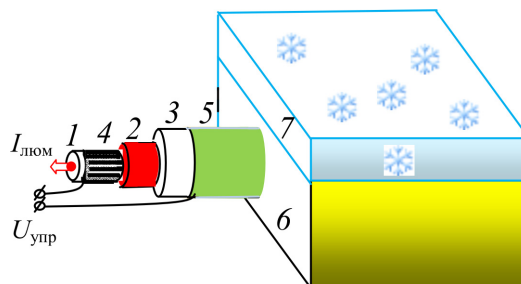


Рис. 1. Фрагмент антиобледенительного полимерного покрытия с наслоением льда

Fig. 1. Fragment of anti-icing polymer coating with ice layering

образуют «двухпроводную» электрическую линию, протяженную вдоль оси PEL-датчика. PEL-датчик расположен внутри однородного гидрофобного полимерного слоя 6, слой льда (обледенение) 7 образуется (нарастает) на наружной (верхней) поверхности покрытия. Механолюминесцентный эффект возникает в результате взаимодействия между собой электролюминесцентного 2 и пьезоэлектрического 3 слоев при вынужденных электромеханических колебаниях (вибрациях) PEL-датчика и в целом антиобледенительного покрытия. Информативные световые сигналы возникают в электролюминесцентном слое 2 и далее проникают через светопрозрачный электрод 4, расположенный на межфазной поверхности «оптоволокно 1/электролюминесцентный слой 2», внутрь оптического волокна 1 и распространяются по нему к приемнику-анализатору интенсивности световых сигналов на выходе из оптического волокна 1. Интенсивность светотдачи  $dI_{\text{люм}} = i_{\text{люм}} d\xi$  на элементарном участке длиной  $d\xi$  электролюминесцентного (EL) слоя PEL-датчика определяется значением суммарного (результатирующего) электрического напряжения

$$U_{\text{люм}}(\xi) = a_1 U_{\text{упр}} + a_2 \sigma(\xi)$$

на этом участке EL-слоя с линейной координатой  $\xi$  с учетом известной (заданной) «функции свечения»  $i_{\text{люм}} = i_{\text{люм}}(U_{\text{люм}})$ , где  $a_{1,2}$  – управляющий и информативный передаточные коэффициенты PEL-датчика,  $U_{\text{упр}}$  – управляющее электрическое напряжение на электродах датчика,  $\sigma(\xi)$  – напряжение (давление), действующее на оптоволоконный PEL-датчик на элементарном участке с линейной координатой  $\xi$ .

Способ удаления обледенения с антиобледенительного покрытия [27] осуществляется следующим образом. Во-первых, регулируют амплитуду вибраций антиобледенительного покрытия посредством задания значений для частоты и амплитуды гармонической составляющей управляющего электрического напряжения внешнего источника электроэнергии на входе двухпроводной линии:

– задают значение для частоты гармонической составляющей управляющего электрического напряжения внешнего источника электроэнергии на входе двухпроводной линии, равное собственной частоте вибраций антиобледенительного покрытия при наличии на его внешней поверхности присоединенного критического слоя льда 7 (присоединенной массы) с максимально допустимым значением толщины, например 2 мм, которое обусловлено конкретными условиями эксплуатации антиобледенительного покрытия; в результате при образовании и достижении толщиной слоя льда этого максимального значения наступает в автоматическом режиме резонансный режим вибраций антиобледенительного покрытия и, как следствие, отслоение и/или разрушение слоя льда;

– задают значение для амплитуды гармонической составляющей управляющего электрического напряже-

ния внешнего источника электроэнергии на входе двухпроводной линии из требования отслоения и/или разрушение слоя льда 7 с учетом неповреждения антиобледенительного покрытия и в целом конструкции, на которой покрытие установлено, в частности при резонансном режиме вибраций.

В результате при отсутствии или «малом» значении (т.е. меньше критического значения) толщины (присоединенной массы  $\Delta m$ ) слоя льда на некотором локальном участке антиобледенительного покрытия для него реализуются незначительные «малые», а при критическом значении толщины слоя льда имеем «большие» резонансные значения амплитуды вибраций этого участка антиобледенительного покрытия, что приводит к разрушению и удалению слоя льда 7 с этого локального участка аэродинамической поверхности.

Во-вторых, осуществляют индикацию и локацию участков появления обледенения и диагностирование неоднородности распределения толщины обледенения, контроль качества очистки от обледенения по протяженной аэродинамической поверхности посредством регистрации на выходе из оптического волокна амплитудно-частотного спектра интегрального светового сигнала при различных значениях частоты гармонической составляющей задаваемого управляющего электрического напряжения на входе двухпроводной линии с учетом считающейся известной зависимости резонансной частоты антиобледенительного покрытия от значений толщины присоединенного к внешней поверхности антиобледенительного покрытия слоя льда, при этом в качестве регистратора используют приемник анализатор интенсивности оптических сигналов. Для решения этой задачи возможно использование алгоритмов: «резонансного диагностирования», «импульсно-резонансного сканирования» [28], заменив в них диагностируемую величину изменения температуры (нагрев) на толщину (присоединенную массу) льда. В результате по алгоритму «резонансного диагностирования» [28] осуществляют расчет производной по частоте для измеряемой зависимости интенсивности светового потока на выходе из оптического волокна для определения «спектра толщины (присоединенной массы) обледенения» – функции плотности распределения толщины (присоединенной массы) обледенения по аэродинамической поверхности из решения интегрального уравнения Фредгольма 1-го рода. По алгоритму «импульсно-резонансного сканирования» [28] осуществляют подачу на вход двухпроводной электрической линии видеоимпульса электрического напряжения при установившихся (стационарных) вынужденных электромеханических колебаниях антиобледенительного покрытия для определения реального неоднородного распределения значений толщины обледенения по аэродинамической поверхности. Алгоритмы «резонансного диагностирования», «импульсно-резонансного сканирования» заяв-

ленного способа индикации, нахождения характеристик и реального распределения толщины (присоединенной массы) льда по аэродинамической поверхности с использованием антиобледенительного покрытия основаны на считающейся известной амплитудно-частотной характеристике представительного элемента антиобледенительного покрытия (см. рис. 1) и зависимости его резонансной частоты  $\nu_*$  от измеряемых значений толщины  $\Delta h$  присоединенного слоя (присоединенной массы  $\Delta m$ ) льда, известное значение резонансной частоты  $\nu_0$  без обледенения при  $\Delta h = 0$ . При изменении толщины  $\Delta h$  присоединенного слоя график амплитудно-частотной характеристики датчика смещается по оси частоты  $\nu$  на величину изменения резонансной частоты  $\Delta \equiv \nu_* - \nu_0 \approx k_\nu \Delta h$  пропорционально изменению толщины  $\Delta h$ . Неоднородность по продольной координате  $\xi$  датчика диагностируемых толщин  $\Delta h(\xi)$  присоединенного слоя льда обуславливает соответствующую информативную неоднородность амплитуд  $\tilde{U}_{\text{люм}}(\xi)$  гармонических (с частотой  $\nu$ ) составляющих электрических напряжений  $U_{\text{люм}}(\xi)$  (1) на электролюминесцентном слое датчика в результате связи  $\Delta(\xi) \equiv \nu_*(\xi) - \nu_0 \approx k_\nu \Delta h(\xi)$  толщин  $\Delta h(\xi)$  присоединенного слоя льда со смещениями резонансных частот  $\Delta(\xi)$  и, как следствие, смещениями по оси частот амплитудно-частотных характеристик  $\tilde{U}_{\text{люм}}(\xi)$  для различных локальных участков датчика. По алгоритму «резонансного диагностирования» искомым «спектр толщины (присоединенной массы) обледенения»  $f_h(\tau)$  – функции плотности распределения толщины  $\Delta h$  (присоединенной массы) обледенения по аэродинамической поверхности находим из решения интегрального уравнения Фредгольма 1-го рода  $g(t) = \int_{-\infty}^{\infty} K(t-s)f(s)ds$  по результатам измеряемых значений производной  $g(\nu) \equiv d\tilde{I}_{\text{люм}}/d\nu$  амплитуды интенсивности свечения  $\tilde{I}_{\text{люм}}$  на выходе из оптического волокна по частоте  $\nu$  гармонической составляющей электрического напряжения на управляющих электродах датчика, где  $f(s) \equiv f_h(\tau)|_{\tau=s/k_\nu}$ , ядро Фредгольма рассчитывается  $K(\nu) \equiv \frac{l}{k_\nu} \left( \frac{\partial^2 \tilde{I}_0(\nu, \bar{l})}{\partial \nu \partial \bar{l}} \right) \Big|_{\bar{l}=0}$  через известную амплитудно-частотную характеристику вида  $\tilde{I}_0(\nu, \bar{l})$  для амплитуды интенсивности свечения фрагмента датчика длиной  $\bar{l}$ , где длина датчика  $l$ , коэффициент пропорциональности  $k_\nu$ . Алгоритм «импульсно-резонансного сканирования» позволяет найти реальное распределение диагностируемых толщин  $\Delta h(\xi)$  присоединенного слоя

льда по антиобледенительному покрытию (на аэродинамической поверхности) через нахождение совокупности распределений амплитудных значений  $\tilde{U}_{\text{люм}}(\xi)$  электрического напряжения на электролюминесцентном слое для различных значений частоты гармонической составляющей управляющего электрического напряжения на электродах датчика посредством использования сканирующего видеопульса, «бегущего» по электродам вдоль датчика.

Таким образом, способ удаления обледенения на аэродинамических поверхностях [27] позволяет осуществить индикацию появления обледенения, проводить локацию участков обледенения и диагностировать толщину слоя льда на каждом из локальных участков внешней протяженной поверхности антиобледенительного покрытия, в автоматическом режиме активизировать функцию очистки от обледенения лишь на тех локальных участках протяженного антиобледенительного покрытия, на внешних поверхностях которых толщина слоя льда достигла установленного (заданного с учетом особенностей эксплуатации конструкции) критического значения, диагностировать качество очистки от обледенения внешней протяженной поверхности антиобледенительного покрытия. В результате достигается повышение эффективности удаления обледенения на аэродинамических поверхностях, особенно для случая протяженных поверхностей, при этом повышается энергоэффективность процесса удаления обледенения из-за снижения энергопотребления процесса очистки от обледенения.

## 2. Результаты численного моделирования

Рассмотрим построение пространственной численной модели представительной ячейки антиобледенительного индикаторного полимерного покрытия со встроенным оптоволоконным PEL-датчиком (рис. 1) с целью изучения закономерностей влияния толщины  $\Delta h$  присоединенного слоя льда на амплитудно-частотные характеристики, собственные частоты и формы колебаний представительной ячейки покрытия. Модальный анализ осуществим на основе численного решения связанной краевой задачи электроупругости о вынужденных стационарных электромеханических колебаниях представительной ячейки в программной системе конечно-элементного анализа ANSYS с использованием многопроцессорного вычислительного комплекса Центра высокопроизводительных вычислительных систем Пермского национального исследовательского политехнического университета. Для решения систем линейных алгебраических уравнений использован итерационный решатель метода сопряженных градиентов JacobiConjugateGradient (JCG) solver, который позволил существенно сократить время счета в сравнении с решателем Sparsedirectequationsolver (SPARSE); время

счета для базового варианта задачи составило около 10 ч для SPARSE и 6 ч для JCG.

Расчетная область для представительной ячейки антиобледенительного покрытия с присоединенным к его внешней (верхней) поверхности слоем льда изображена на рис. 2, где размеры  $a = 12$  мм,  $b = 3.5$  мм,  $c = 30$  мм, значения толщины слоя льда  $h = 0.5$  мм, 1 мм, 2 мм. Для концентрических цилиндрических межфазных поверхностей области PEL-датчика задан радиус оптического волокна  $r_1 = 1$  мм, который приравнен к радиусу «бесконечно тонкого» внутреннего светопрозрачного электрода в виде цилиндрической поверхности и к внутреннему радиусу электролюминесцентного слоя, внешний радиус электролюминесцентного слоя  $r_2 = 1,1$  мм равен внутреннему радиусу пьезоэлектрического слоя, внешний радиус пьезоэлектрического слоя  $r_3 = 1,4$  мм равен радиусу «бесконечно тонкого» наружного электрода, который также имеет вид цилиндрической поверхности. Нижняя грань (основание) представительной ячейки индикаторного полимерного покрытия жестко закреплена (неподвижна), на боковых гранях ячейки заданы условия симметрии, верхняя грань ячейки покрытия или, при наличии, присоединенного к нему слоя льда считается свободной от нагрузок. Управляющее электрическое напряжение  $U_{упр}$  на электродах PEL-датчика изменялось по гармоническому закону с амплитудой  $A = 1$ В, так как на внутреннем электроде потенциал изменялся по закону синуса  $A \sin(\omega t)$ , а на внешнем электроде потенциал равен нулю, где круговая частота  $\omega$ , время  $t$ .

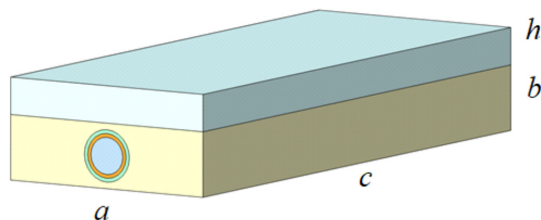


Рис. 2. Расчетная область представительной ячейки индикаторного покрытия с присоединенным слоем льда

Fig. 2. Design area of representative cell of indicator coating with attached ice layer

Пьезоэлектрический цилиндрический слой PEL-датчика выполнен из полимерного материала PVDF [29, 30] с направлением поляризации (осью трансверсальной изотропии) по радиальной координате  $r$  в цилиндрической системе координат  $r, \theta, \xi$ . Трансверсально-изотропные электроупругие свойства PVDF заданы в этой системе координат через независимые компоненты тензоров, в частности: для упругих свойств имеем  $C_{0000} = 8,6$  ГПа,  $C_{r\theta\theta} = C_{r\xi\xi} = 5,4$  ГПа,  $C_{rrrr} = 7,1$  ГПа,  $C_{00\xi\xi} = 5,6$  ГПа, для пьезоэлектрических свойств  $-e_{r00} = -1,1$  Кл/м<sup>2</sup>,  $e_{rrr} = 2,9$  Кл/м<sup>2</sup>, для относительных диэлектрических проницаемостей  $-\lambda_{rr} = 12,4$ ,  $\lambda_{\theta\theta} = \lambda_{\xi\xi} = 14,7$ , значение плотности

материала  $\rho = 1780$  кг/м<sup>3</sup>. Изотропные упругие свойства оптического волокна, люминесцентного цилиндрического слоя (люминофора) PEL-датчика, полимерной матрицы (корпуса) индикаторного полимерного покрытия и присоединенного слоя льда приведены в табл. 1.

Таблица 1

Свойства материалов

Table 1

Material properties

Материал	Модуль Юнга $E$ , ГПа	Коэффициент Пуассона $\nu$	Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>
Оптическое волокно	50	0.25	2200
Люминофор	0.8	0.43	4000
Полимер (корпус)	0.004	0.45	1280
Лед	28	0.31	917

Результаты расчета собственных частот и форм колебаний представительной ячейки индикаторного полимерного покрытия со встроенным оптоволоконным PEL-датчиком (см. рис. 1, 2) приведены на рис. 3 и в табл. 2 в зависимости от толщины присоединенного к нему слоя льда для случая действия вынуждающей гармонической «силы» в виде управляющего электрического напряжения  $U_{упр}$  на электродах PEL-датчика. Таким образом, установив частоту управляющего электрического напряжения, например на значении 5152,5 Гц (см. табл. 2), мы настраиваем антиобледенительное покрытие на значение «критической» (т.е. максимально допустимой) толщины льда 2 мм.

Таблица 2

Собственные частоты ячейки индикаторного покрытия со слоем льда

Table 2

Natural frequencies of the indicator coating cell with ice layer

Толщина слоя льда, мм	Собственные частоты, Гц					
	0	3059.7	3110.7	3501.7	3526.1	3743.9
0.5	4995.3	5127.1	5143.4	5405.5	5470.2	5499.8
1	5124.0	5168.4	5621.3	5743.7	5856.3	6417.0
2	5152.5	5171.1	5790.4	5837.1	6209.0	6515.2

Для оценки возможности очистки поверхности антиобледенительного полимерного покрытия от обледенения в результате разрушения (когезионного и/или адгезионного) по границе «покрытие/лед» на рис. 4, 5 даны результаты расчета эквивалентного напряжения  $\sigma_{Mises}$  по Мизесу и касательных  $\tau = \sqrt{\sigma_{xx}^2 + \sigma_{yy}^2}$  напряжений на этой границе при реализациях первых собственных частот колебаний и амплитудно-частотные характеристики в окрестности первых собственных частот для соответствующих осредненных значений напряжений  $\langle \sigma_{Mises} \rangle$ ,  $\langle \tau \rangle$  при значениях толщины ледяной корки  $h = 0,5$ ; 1 и 2 мм (см. частоты в 1-й колонке табл. 2).



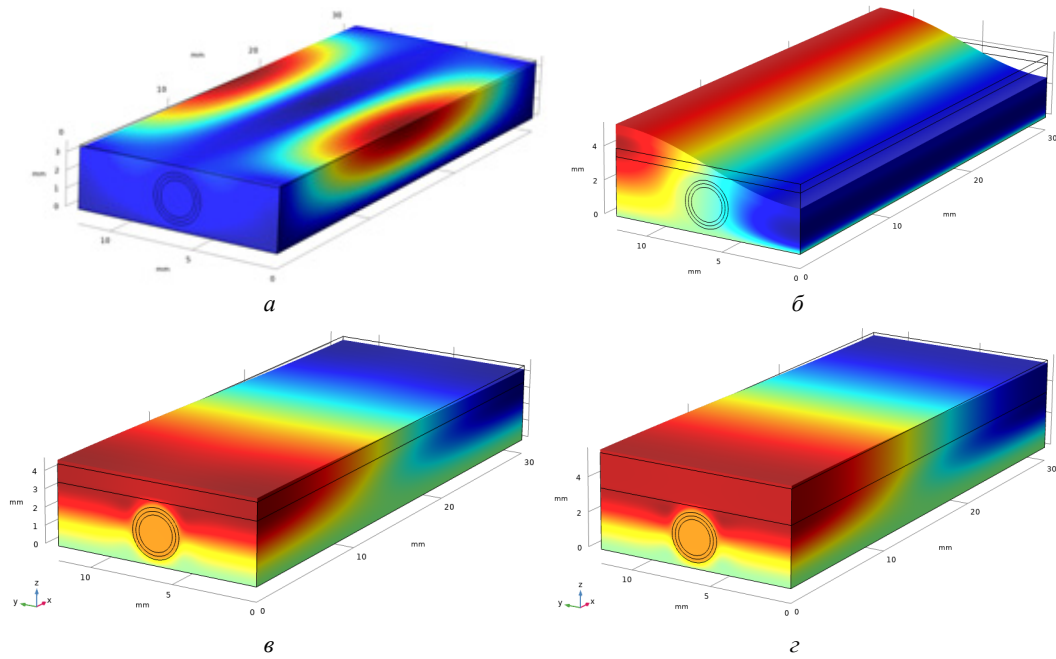


Рис. 3. Первые собственные формы (поля перемещений) представительной ячейки при различных значениях толщины слоя льда  $h = 0$  мм (а), 0,5 мм (б), 1 мм (в), 2 мм (г)

Fig. 3. First natural forms (displacement fields) of representative cell at different values of ice layer thickness  $h = 0$  mm (a), 0.5 mm (б), 1 mm (в), 2 mm (г)

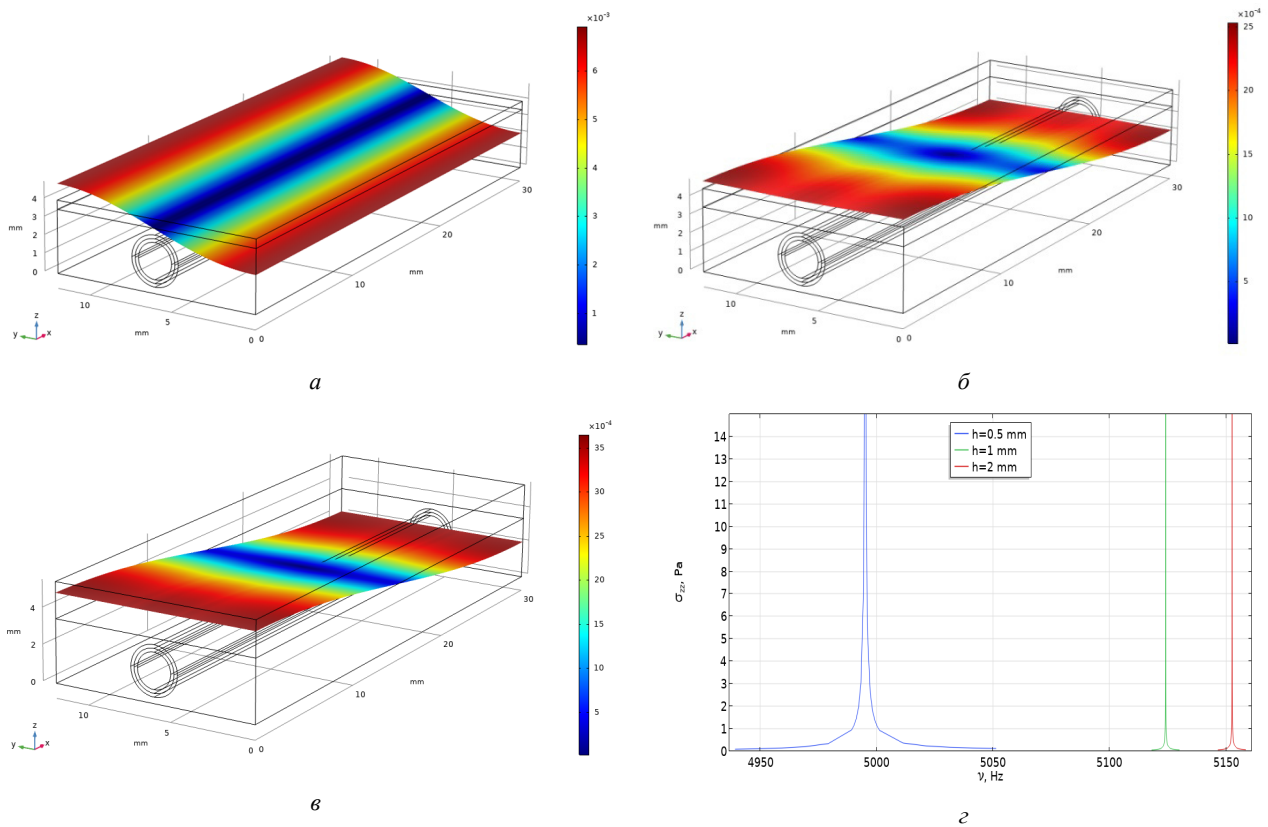


Рис. 4. Поля амплитуды эквивалентного напряжения  $\sigma_{\text{Mises}}$  по Мизесу на границе «покрытие/лед» (а)–(в) и зависимость осредненного по границе значения  $\langle \sigma_{\text{Mises}} \rangle$  от частоты  $\nu$  управляющего электрического напряжения  $U_{\text{упр}}$  (г) при толщине слоя льда  $h = 0,5, 1$  и 2 мм

Fig. 4. Fields of equivalent Mises stress amplitude  $\sigma_{\text{Mises}}$  at the coating/ice boundary (a)–(в) and dependence of averaged value  $\langle \sigma_{\text{Mises}} \rangle$  on the boundary on frequency  $\nu$  of control voltage  $U_{\text{con}}$  (г) at thickness of ice layer  $h = 0.5, 1$  and 2 mm

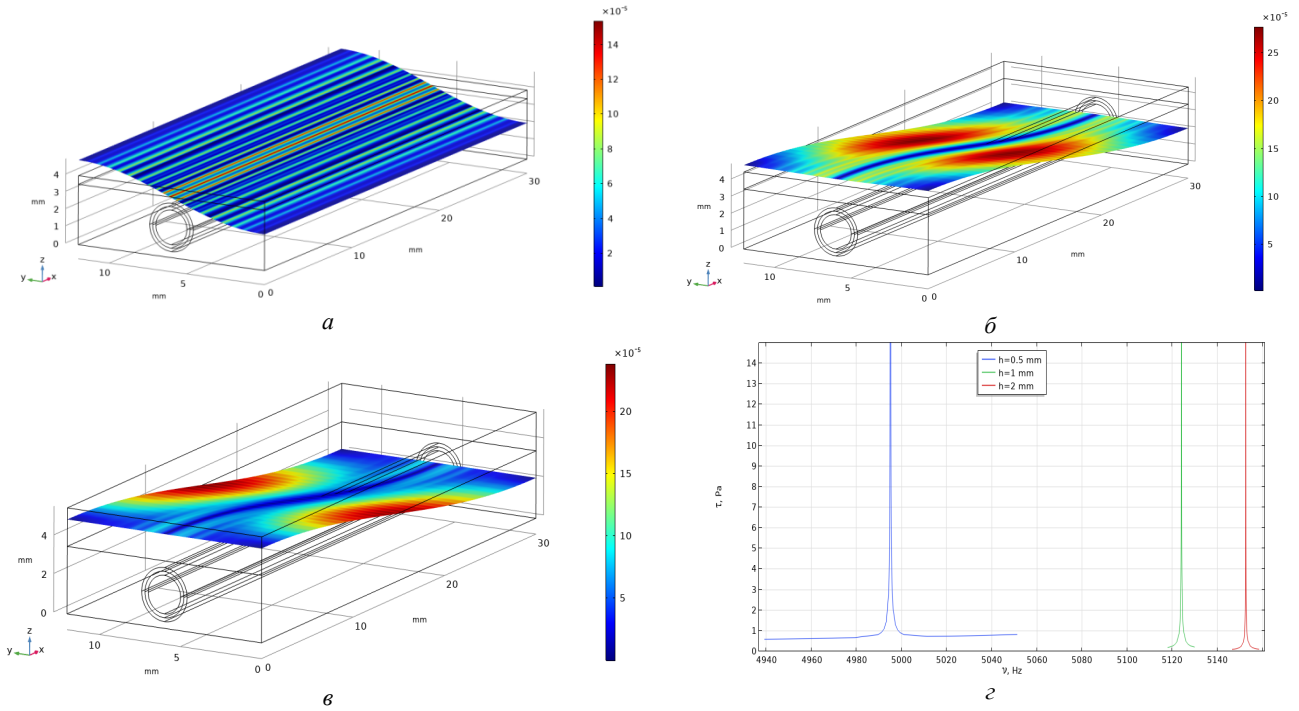


Рис. 5. Поля амплитуды касательного напряжения  $\tau$  на границе «покрытие/лед» (а)–(б) и зависимость осредненного по границе значения  $\langle \tau \rangle$  от частоты  $\nu$  управляющего электрического напряжения  $U_{упр}$  (г) при толщине слоя льда  $h = 0,5, 1$  и  $2$  мм

Fig. 5. Fields of amplitude of tangent voltage  $\tau$  at the boundary "coating/ice" (a)–(b) and dependence of the value averaged by the boundary  $\langle \tau \rangle$  on frequency  $\nu$  of control voltage  $U_{con}$  (g) at thickness of ice layer  $h = 0.5, 1$  and  $2$  mm

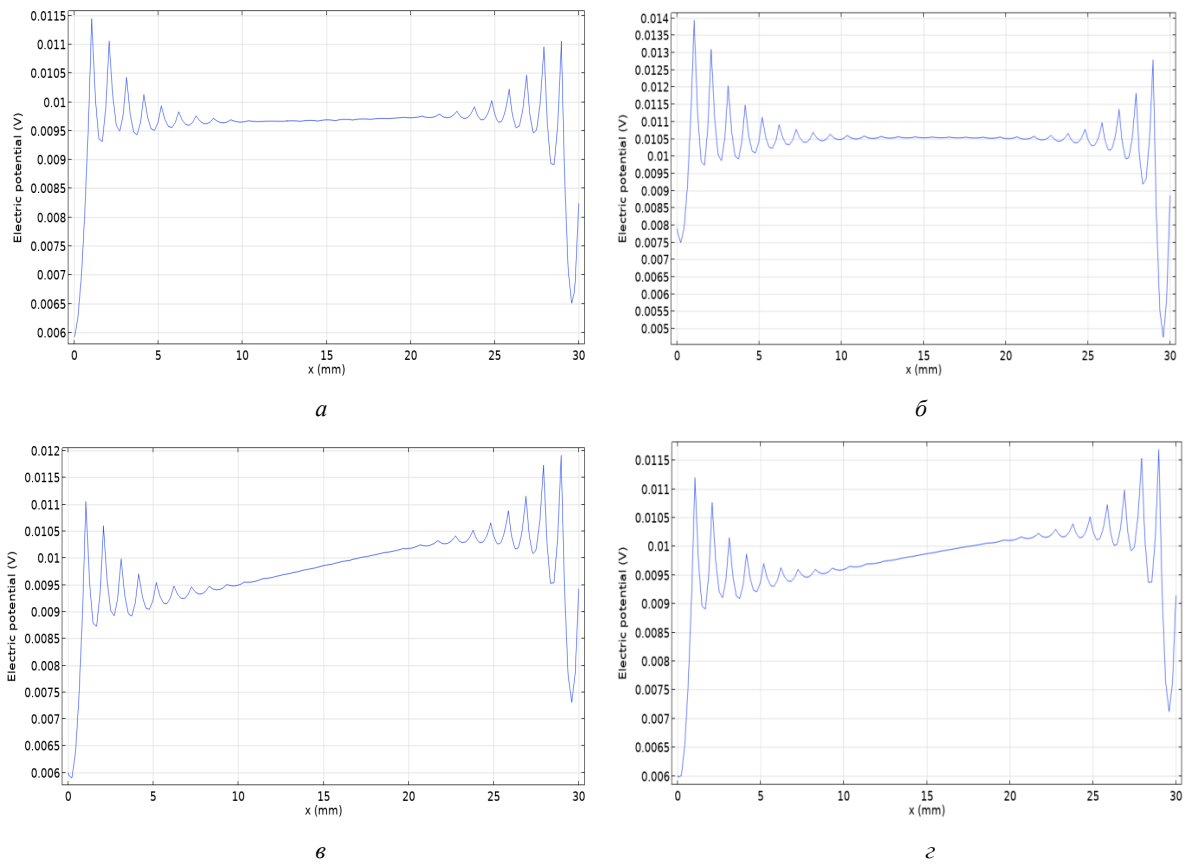


Рис. 6. Распределение амплитуды электрического напряжения  $U_{lum}$  на электролюминесцентном слое датчика вдоль продольной координаты  $x \equiv \xi$  при толщине слоя льда  $h = 0$  (а),  $0,5$  мм (б),  $1$  мм (в),  $2$  мм (г)

Fig. 6. Distribution of amplitude of voltage  $U_{lum}$  on electroluminescent layer of sensor along longitudinal coordinate  $x \equiv \xi$  at thickness of ice layer  $h = 0$  (a),  $0.5$  mm (b),  $1$  mm (v),  $2$  mm (g)



Форму информативных импульсов интенсивности света на выходе из оптического волокна РЕЛ-датчика обуславливает вид распределения амплитуды электрического напряжения  $U_{\text{люм}}$  вдоль электролюминесцентного слоя датчика. В результате по форме световых импульсов может быть дана оценка вида реализуемой формы колебаний и, как следствие, оценка толщины образовавшегося слоя льда. На рис. 6 представлены графики распределения величины  $\langle U_{\text{люм}} \rangle$  – осредненной (по окружной координате  $\theta$ ) амплитуды электрического напряжения на электролюминесцентном слое датчика вдоль продольной координаты  $x$  для случая без обледенения ( $h = 0$ , см. рис. 6, а) и при толщине слоя льда  $h = 0,5; 1; 2$  мм (см. рис. 6, б–г) для первых собственных частот. Использование в антиобледенительном полимерном покрытии многопараметрического, например «шестисекторного» оптоволоконного РЕЛ-датчика для сложного напряженного состояния [25], позволит более точно идентифицировать реализующую форму колебаний покрытия и, как следствие, более точно диагностировать толщину присоединенного к покрытию слоя льда с использованием уже не одной (см. рис. 6), а шести характеристических функций для каждой из возможных форм.

## Библиографический список

1. Егер С.М., Матвеев А.М., Шаталов И.А. Основы авиационной техники. – М.: Машиностроение, 2003. – 720 с.
2. Cao Y., Tan W., Wu Z. Aircraft icing: an ongoing threat to aviation safety // *Aerospace Science and Technology*. – 2018. – № 75. – P. 353–385.
3. Ice protection systems for wind turbines in cold climate: characteristics, comparisons and analysis / O. Fakorede, Z. Feger, H. Ibrahim, A. Ilincă, J. Perron, C. Masson // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2016. – Vol. 65. – P. 662–675.
4. Embedded Temperature and Anti-Icing Monitoring Systems Directly Printed on 3D Shaped Substrates / M. Knoll, C. Offenzeller, B. Jakoby, W. Hilber // *IEEE Sensors Journal*. – 2020. – Vol. 20, № 10. – P. 5314–5321.
5. An experimental study on soft PDMS materials for aircraft icing mitigation / Y. Liu, L. Ma, W. Wang, A.K. Kota, H. Hu // *Applied Surface Science*. – 2018. – Vol. 447. – P. 599–609.
6. Designing durable icephobic surfaces / K. Golovin, S.P.R. Kobaku, D.H. Lee [et al.] // *Science Advances*. – 2016. – Vol. 2, № 3. – P. e1501496
7. The icephobicity comparison of polysiloxane modified hydrophobic and superhydrophobic surfaces under condensing environments / Y. Wang, J.L. Mingzhen, L. Qingjun [et al.] // *Applied Surface Science*. – 2016. – Vol. 385. – P. 472–480.
8. Self-crosslinking coatings of fluorinated polysiloxanes with enhanced icephobicity / X. Li, Y. Li, L. Ren [et al.] // *Thin Solid Films*. – 2017. – Vol. 639. – P. 113–122.
9. Self-lubricating icephobic elastomer coating (SLIC) for ultralow ice adhesion with enhanced durability / Y.H. Yeong, A. Milonitis, E. Loth, J. Sokhey // *Cold Regions Science and Technology*. – 2018. – Vol. 148. – P. 29–37.
10. Development and evaluation of poly (dimethylsiloxane) based composite coatings for icephobic applications / J. Liu, J. Wang, L. Mazzola, H. Memon, T. Barman, B. Turnbull // *Surface and Coatings Technology*. – 2018. – Vol. 349. – P. 980–985.

## Заключение

Таким образом, новое антиобледенительное полимерное покрытие и предложенный способ удаления обледенения на аэродинамических поверхностях [27] позволяет осуществить индикацию появления обледенения, проводить локацию участков обледенения и диагностировать толщину слоя льда на каждом из локальных участков внешней протяженной поверхности покрытия, в автоматическом режиме активизировать функцию очистки от обледенения лишь на тех локальных участках покрытия, на которых толщина образовавшегося слоя льда достигла установленного (заданного с учетом особенностей эксплуатации конструкции) критического значения и (по окончании этапа очистки) диагностировать качество очистки от обледенения покрытия. В результате такой «интеллектуальной» активации очистки поверхности, когда для различных реализаций нерегулярного взаимного расположения локальных зон обледенения на рассматриваемой поверхности покрытия активируются лишь соответствующие локальные зоны покрытия, повышается энергоэффективность покрытия в целом, особенно для протяженных аэродинамических поверхностей.

11. Особенности получения антиобледенительных покрытий (обзор) / Л.В. Соловьянич, С.В. Кондрашов, В.С. Нагорная, А.А. Мельников // *Труды ВИАМ*. – 2018. – № 6. – С. 77–98.
12. Раскутин А.Е., Хрульков А.В., Язвенко Л.Н. Полимерное пленочное покрытие для конструкций из ПКМ (обзор) // *Труды ВИАМ*. – 2017. – № 2. – С. 33–40.
13. Исследование динамики замерзания капли воды на поверхности нанокompозита в длинноволновом инфракрасном диапазоне / А.А. Мельников, В.С. Нагорная, Л.В. Соловьянич, С.В. Кондрашов // *Журнал технической физики*. – 2018. – Т. 88, № 12. – С. 1853–1858.
14. Effect of wettability and surface roughness on ice-adhesion strength of hydrophilic, hydrophobic and superhydrophobic surfaces / T. Bharathidasan, K. Vijay, S.B. Musuvathi [et al.] // *Applied Surface Science*. – 2014. – Vol. 314. – P. 241–250.
15. Relationships between water wettability and ice adhesion / A.J. Meuler, J. Smith, K. Varanasi [et al.] // *ACS applied materials & interfaces*. – 2010. – Vol. 2, № 11. – P. 3100–3110.
16. The relationship between water wetting and ice adhesion / A. Dotana, H. Dodiuka, C. Laforte, S. Kenig // *Journal of Adhesion Science and Technology*. – 2009. – № 23. – P. 1907–1915.
17. Effects of surface roughness and energy on ice adhesion strength / M. Zou, S. Beckford, R. Wei [et al.] // *Applied Surface Science*. – 2011. – Vol. 257, № 8. – P. 3786–3792.
18. Wang H., He G., Tian Q. Effects of nano-fluorocarbon coating on icing // *Applied surface science*. – 2012. – Vol. 258, № 18. – P. 7219–7224.
19. Nitrile butadiene rubber composites reinforced with reduced graphene oxide and carbon nanotubes show superior mechanical, electrical and icephobic properties / L. Valentini, S. Bittoleto Bon, M. Hernández, N.M. Pugno // *Composites Science and Technology*. – 2018. – Vol. 166. – P. 109–114.

20. Исследование адгезии льда к наномодифицированным полиуретановым покрытиям / С.В. Кондрашов, Л.В. Соловьянчик, А.А. Пыхтин, В.С. Ведникова, Э.Р. Бадамшина, А.С. Джалмуханова, С.В. Карпов // Термопластичные материалы и функциональные покрытия: материалы всероссийской научно-технической конференции (г. Москва, 23 апреля 2019 г.); ФГУП «ВИАМ». – М.: ВИАМ, 2019. – С. 118–133.

21. Исследование зависимости адгезии льда к полиуретановым покрытиям от их физико-механических свойств / С.В. Кондрашов, А.А. Пыхтин, Л.В. Соловьянчик, В.А. Большаков, Б.Ф. Павлюк, Э.Р. Бадамшина, А.С. Джалмуханова, С.В. Карпов // Труды ВИАМ. – 2019. – № 3. – С. 87–95.

22. Пат. RU № 2453475. Устройство обнаружения наличия ледяного слоя или жидкости и их удаления / ДЕ СМЕ Мари-Анн, опубл.: 20.06.2012 Бюл. № 17.

23. Пат. RU № 2483000. Пьезоэлектрическая противообледенительная система воздухозаборника / ЛЕ ДОКТ Тьерри, опубл.: 27.05.2013 Бюл. № 15.

## References

1. Eger S.M., Matveenko A.M., SHatalov I.A. Osnovy avia-tsionnoj tekhniki [Fundamentals of aviation technology]. Moscow, Mashinostroenie, 2003, 720 p.

2. Cao Y., Tan W., Wu Z. Aircraft icing: an ongoing threat to aviation safety. *Aerospace Science and Technology*, 2018, no. 75, pp. 353-385.

3. Fakorede O., Feger Z., Ibrahim H., Ilinca A., Perron J., Masson C. Ice protection systems for wind turbines in cold climate: characteristics, comparisons and analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, vol. 65, pp. 662-675.

4. Knoll M., Offenzeller C., Jakoby B., Hilber W. Embedded Temperature and Anti-Icing Monitoring Systems Directly Printed on 3D Shaped Substrates. *IEEE Sensors Journal*, 2020, vol. 20, no. 10, pp. 5314-5321.

5. Liu, Y., Ma, L., Wang, W., Kota, A. K., Hu, H. An experimental study on soft PDMS materials for aircraft icing mitigation. *Applied Surface Science*, 2018, vol. 447, pp. 599-609.

6. Golovin K., Kobaku S.P.R., Lee D.H. et al. Designing durable icephobic surfaces. *Science Advances*, 2016, vol. 2, no. 3, pp. e1501496.

7. 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, pp. 472-480.

8. Li X., Li Y., Ren L. et al. Self-crosslinking coatings of fluorinated polysiloxanes with enhanced icephobicity. *Thin Solid Films*, 2017, vol. 639, pp. 113-122.

9. 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, pp. 29-37.

10. Liu J., Wang J., Mazzola L., Memon H., Barman T., Turnbull B. Development and evaluation of poly (dimethylsiloxane) based composite coatings for icephobic applications. *Surface and Coatings Technology*, 2018, vol. 349, pp. 980-985.

11. Solov'yanchik L.V., Kondrashov S.V., Nagornaya V.S., Mel'nikov A.A. Osobennosti polucheniya antiobledenitel'nyh pokrytij (obzor) [Features of obtaining anti-icing coatings (review)]. *Trudy VIAM*, 2018, no. 6, pp. 77-98.

12. Raskutin A.E., Hrul'kov A.V., YAzvenko L.N. Polimer-noe plenochnoe pokrytie dlya konstrukcij iz PKM (obzor) [Poly-

24. Пат. RU № 2630537. Волоконно-оптический датчик давления / Паньков А.А., опубл. 11.09.2017 Бюл. № 26.

25. Пат. RU № 2643692. Волоконно-оптический датчик объемного напряженного состояния / Паньков А.А., опубл.: 05.02.2018 Бюл. № 4.

26. Пат. RU № 2698958. Сенсорная система / Паньков А.А., опубл.: 02.09.2019 Бюл. № 25.

27. Способ удаления обледенения на аэродинамических поверхностях / Паньков А.А., заявка № 2020132202 от 28.09.2020 г.

28. Pan'kov A.A. Piezoelectroluminescent fiber-optic sensors for temperature and deformation fields // *Sensors and Actuators A: Physical*. – 2019. – Vol. 288. – P. 171–176.

29. Хорошун Л.П., Маслов Б.П., Лещенко П.В. Прогнозирование эффективных свойств пьезоактивных композитных материалов. – Киев: Наук. думка, 1989. – 208 с.

30. Sessler G.M. Piezoelectricity in polyvinylidene fluoride // *J. Acoust. Soc. Amer.* – 1981. – Vol. 70, № 6. – P. 1596–1608.

mer film coating for structures from PKM (review)]. *Trudy VIAM*, 2017, no. 2, pp. 33-40.

13. Mel'nikov A.A., Nagornaya V.S., Solov'yanchik L.V., Kondrashov S.V. Issledovanie dinamiki zamerzaniya kapli vody na poverhnosti nanokompozita v dlinnovolnovom infrakrasnom diapazone [Study of the dynamics of freezing of a water drop on the surface of a nanocomposite in the long-wave infrared range]. *ZHurnal tekhnicheskoy fiziki*, 2018, vol. 88, no. 12, pp. 1853-1858.

14. Bharathidasan T., Vijay K., Musuvathi S B. et al. Effect of wettability and surface roughness on ice-adhesion strength of hydrophilic, hydrophobic and superhydrophobic surfaces. *Applied Surface Science*, 2014, vol. 314, pp. 241-250.

15. Meuler A.J., Smith J., Varanasi K. et al. Relationships between water wettability and ice adhesion. *ACS applied materials & interfaces*, 2010, vol. 2, no. 11, pp. 3100-3110.

16. Dotana A., Dodiuka H., Laforteb C., Kenig S. The relationship between water wetting and ice adhesion. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2009, no. 23, pp. 1907-1915.

17. 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, pp. 3786-3792.

18. Wang H., He G., Tian Q. Effects of nano-fluorocarbon coating on icing. *Applied surface science*, 2012, vol. 258, no. 18, pp. 7219-7224.

19. Valentini L., Bittolo Bon S., Hernández M., Pugno N.M. 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, pp. 109-114.

20. Kondrashov S.V., Solov'yanchik L.V., Pyhtin A.A., Vednikova V.S., Badamshina E.R., Dzhalmuhanova A.S., Karpov S.V. Issledovanie adgezii l'da k nanomodificirovannym poliuretanovym pokrytiyam [A research of adhesion of ice to the nanomodified polyurethane coverings]. *Termoplastichnye materialy i funkcion-al'nye pokrytiya: Materialy Vserossijskoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii (g. Moskva, 23 aprelya 2019 g.)*, [Elektronnyj resurs]. FGUP «VIAM», M.: VIAM, 2019, 225 p., pp. 118-133.

21. Kondrashov S.V., Pyhtin A.A., Solov'yanchik L.V., Bol'shakov V.A., Pavlyuk B.F., Badamshina E.R., Dzhalmuhanova A.S., Karpov S.V. Issledovanie zavisimosti adgezii l'da k poliuretanovym pokrytiyam ot ih fiziko-mekhanicheskikh svoystv [Study of the dependence of

ice adhesion to polyurethane coatings on their physical and mechanical properties]. *Trudy VLAM*, 2019, no. 3, pp. 87-95.

22. Patent RU № 2453475. Ustrojstvo obnaruzheniya nalichiya ledyanogo sloya ili zhidkosti i ih udaleniya [Device for detecting the presence of an ice layer or liquid and their removal]. DE SME Mari-Ann, opubl.: 20.06.2012 Byul. no. 17.

23. Patent RU № 2483000. P'ezoelektricheskaya protivoblledenitel'naya sistema vozduhozabornika [Piezoelectric anti-icing air intake system]. LE DOKT Terri, opubl.: 27.05.2013 Byul. no. 15.

24. Patent RU № 2630537. Volokonno-opticheskij datchik davleniya [Fiber-optic pressure sensor]. Pan'kov A.A., opubl.: 11.09.2017 Byul. no. 26.

25. Patent RU № 2643692. Volokonno-opticheskij datchik ob'emnogo napryazhennogo sostoyaniya [Fiber-optic sensor of volumetric stress state]. Pan'kov A.A., opubl.: 05.02.2018 Byul. no. 4.

26. Patent RU № 2698958. Sensornaya sistema [Sensory system]. Pan'kov A.A., opubl.: 02.09.2019 Byul. no. 25.

27. Sposob udaleniya obledeneniya na aerodinamicheskikh poverhnostyah [Method for Removal of Icing on Aerodynamic Surfaces]. Pan'kov A.A., zayavka no. 2020132202 ot 28.09.2020 g.

28. Pan'kov A.A. Piezoelectroluminescent fiber-optic sensors for temperature and deformation fields. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2019, vol. 288, pp. 171-176.

29. Horoshun L.P., Maslov B.P., Leshchenko P.V. Prognozirovaniye effektivnykh svoystv p'ezoaktivnykh kompozitnykh materialov [Prediction of effective properties of piezoactive composite materials]. Kiev, Nauk. dumka, 1989, 208 p.

30. Sessler G.M. Piezoelectricity in polyvinylidene fluoride. *J. Acoust. Soc. Amer.*, 1981, vol. 70, no. 6, pp. 1596-1608.

**Финансирование. Благодарность.** Результаты получены при выполнении государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации на выполнение фундаментальных научных исследований (проект № FSNM-2020-0026).

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Funding. Acknowledgment.** The results were obtained in the course of fulfilling the state task of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation for the implementation of fundamental scientific research (project No. FSNM-2020-0026).

**Conflict of interest.** The authors declare no conflict of interest.