

Г.М. Гуняев¹, Л.В. Чурсова¹, А.Е. Раскутин¹, А.Г. Гуняева¹

МОЛНИЕСТОЙКОСТЬ СОВРЕМЕННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

Разработано молниезащитное покрытие (МЗП) на основе углеродных наполнителей и полимерных связующих, модифицированных наночастицами, обеспечивающее надежную защиту несущих элементов конструкций из углепластиков, выходящих на внешний контур планера самолета, от сквозных пробоев, прогаров, расщеплений, возникающих в результате воздействия сдвигающихся разрядов молнии с параметрами $I=200$ кА и $Q=20$ Кл.

Применение МЗП позволяет: сократить внутренние разрушения непосредственно конструктивно-силовой части изделия; создать многовекторность рассеяния тока молнии; минимизировать влияние матрицы как диэлектрика; увеличить трансверсальные тепло- и электропроводящие характеристики композиции более чем в 2,5 раза; значительно сократить благодаря термостойкости матрицы разрушения, возникающие в результате деструктивных процессов; исключить увеличение массы изделия, так как МЗП входит в расчетную схему несущей конструкции.

Разработаны рекомендации по составу углепластиков для молниезащиты деталей и агрегатов, выходящих на внешнюю поверхность фюзеляжа самолета (при толщине обшивки $>2,5$ мм) в зоне действия сдвигающихся разрядов молнии с параметрами $I=200$ кА и $Q=20$ Кл.

Ключевые слова: молниестойкость, молниезащитные покрытия (МЗП), высоковольтный разряд, полимерные композиционные материалы, наночастицы, астралены, углепластики, углеродные ткани.

G.M. Gunyaev¹, L.V. Chursova¹, A.E. Raskutin¹, A.G. Gunyaeva¹

LIGHTNING RESISTANCE OF THE PRESENT-DAY POLYMER COMPOSITES

The lightning-protective coating (LPC) was developed on the base of carbon fillers and polymer binders, modified by nanoparticles, ensuring the reliable protection of bearing carbon fiber reinforced plastic (CFRP) structural elements, applied in the outer airframe contour against through holes, burn-outs splittings, appearing, as a result of shifting lightning discharges effect with the parameters of $I=200$ kA and $Q=20$ C.

The LPC application allows: to reduce inner fractures of directly structure bearing parts; to create multivector for lightning current scattering; to minimize the matrix effect, as a dielectric; to increase the transversal heat- and electroconducting characteristics of a composition by more than 2,5 times; to reduce considerably fractures, appearing due to destructive processes at the expense of matrix heat resistance; to exclude a product weight increase as LPC is included into the calculative diagram of bearing structures.

The recommendations have been developed FCRP compositions designating for the lightning protection of components and aggregates, applied in the outer aircraft fuselage surfaces (at the skin thickness of $<2,5$ mm) in the zone of shifting lightning discharges with the parameters: $I=200$ kA and $Q=20$ C.

Keywords: lightning resistance, lightning-protective coating (LPC), high-volt discharge, polymer composite material, nanoparticles, astralenes, carbon fiber reinforced plastic (CFRP), carbon fabric.

¹ Федеральное 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

Важнейшая задача, связанная с обеспечением надежной эксплуатации современной авиационной техники во всепогодных условиях, – обеспечение молниезащищенности самолетных конструкций из полимерных композиционных материалов: стеклопластиков, органопластиков и, в первую очередь, углепластиков, наиболее широко применяемых в конструкциях планера.

Стекло- и органопластики являются диэлектриками, и конструкции из них требуют специальной защиты, в том числе от накопления статического электричества. Углепластики – полупроводники, обладающие определенной молниестойкостью, но конструкции из них при поражении молниевым разрядом получают повреждения, недопустимые по требованиям безопасности полетов. Поэтому эти материалы проверяют на молниестойкость.

Испытания на молниестойкость проводятся на высоковольтных стендах при воздействии на материал электрических разрядов, имитирующих параметры тока молнии [1]. В данном случае испытания на молниестойкость проводились при воздействии токов, имитирующих воздействие токов молнии в зоне смещающихся разрядов, возникновение которых наиболее вероятно на большей части обдуваемой воздухом поверхности планера. В этом случае параметры испытания складываются как сумма двух компонентов А+С, где А – импульс главного разряда с током $I=200$ кА; С – постоянная составляющая тока (переносимый электрический заряд) $Q=20$ Кл. Испытания проводились в НИЦ 26 ЦНИИ МО РФ на генераторах тока ГИТ-1 и ГИТ-3, имитирующих соответственно компоненты А и С токов молнии. Генераторы аттестованы в Госстандарте России.

При воздействии молниевых разрядов разрушения полимерных композиционных материалов носят характер сквозных пробоев при полном послойном расслоении; образцы из стекло- и органопластиков разрушаются на несколько фрагментов (рис. 1).

В табл. 1 приведен перечень характерных видов повреждений полимерных образцов стекло- и органотекстолитов толщиной 2–2,5 мм при воздействии высоковольтных разрядов с параметрами тока $I=200$ кА, $Q=20$ Кл.

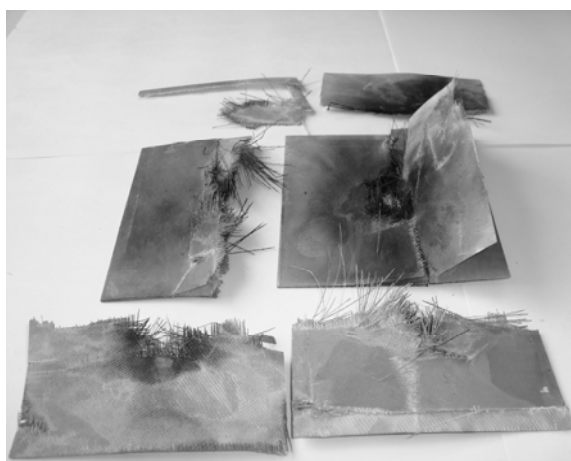


Рис. 1. Образцы стеклопластика марки Т-10/УП-2227 толщиной 2,5 мм после воздействия тока с параметрами $I=200$ кА, $Q=20$ Кл

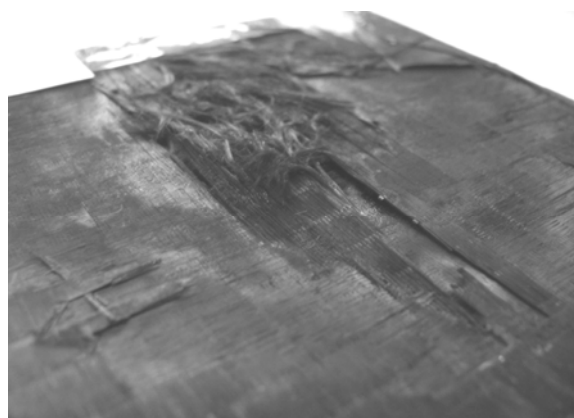


Рис. 2. Образец углепластика на основе углеродного наполнителя Элур-0,1П и связующего ВС-2526к после воздействия тока с параметрами $I=200$ кА, $Q=20$ Кл

Типичные разрушения образцов стекло- и органотекстолитов в зоне поражения высоковольтным разрядом с параметрами тока $I=200$ кА, $Q=20$ Кл

Материал	Характер повреждения
Стеклотекстолит УП-2227/Т-10 без МЗП	Сквозной пробой диаметром до 15 мм; разрушение образца на 4–6 отдельных фрагментов; многочисленные расслоения по толщине по всей площади образца; выгорание связующего вокруг зоны сквозного пробоя на 5–7 мм
Органотекстолит Русар УП-2227 без МЗП	Сквозной пробой диаметром до 15 мм; сквозные трещины во взаимно перпендикулярных направлениях длиной до 80 мм; деформирование образца; расслоения по всей площади образца; выгорание связующего вокруг зоны сквозного пробоя на 3–5 мм

Особое место среди полимерных композиционных материалов занимают углепластики, которые являются полупроводниками благодаря применению углеродных армирующих наполнителей и занимают промежуточное положение между полимерными композиционными материалами типа стекло- и органопластиков и металлами. Электропроводность углепластиков на 3–4 порядка ниже электропроводности алюминиевых сплавов, однако на 5–8 порядков выше электропроводности стекло- и органопластиков.

На рис. 2 представлен образец углепластика на основе углеродного наполнителя Элур-0,1П и связующего ВС-2526к после воздействия тока с параметрами $I=200$ кА, $Q=20$ Кл. Разрушение такого образца углепластика сопровождается расщеплением и уносом верхних слоев конструкции размером 80×85 мм, что при последующем воздействии набегающих турбулентных потоков воздуха может привести к его разрушению.

Однако по сравнению с результатами испытаний стекло- и органопластиков, разрушенных на несколько фрагментов при воздействии высоковольтного разряда, преимущество в молниестойкости углепластиков очевидно.

Известно, что для современных летательных аппаратов, изготовленных с применением углепластиков, разработаны различные варианты защиты от молнии. Достигается это путем нанесения на поверхность углепластиковых конструкций сплошных или дискретных металлических молниезащитных покрытий (МЗП), которые обеспечивают близкие по отношению к металлическим материалам величины электро- и теплопроводности. Используются, в частности, молниезащитные системы на основе приклеенной фольги или напыленных металлов (алюминий, медь, никель), медных или алюминиевых шин, сеток, слоев бороалюминия. При этом такие параметры, как, например, толщина покрытия, шаг шин, диаметр проволоки и величина ячейки, выбираются в зависимости от возможного характера воздействия молнии на конкретный агрегат [2, 3]. Таким образом, повышение молниестойкости конструкций из углепластиков достигается повышением электропроводности самих углепластиков путем металлизации углеродных волокон. Недостатком этих МЗП является увеличение массы летательного аппарата и низкая коррозионная стойкость. Для молниезащиты углепластиковых авиационных конструкций в настоящее время наибольшее распространение получило МЗП на основе бронзовых или латунных сеток, которые накладываются на поверхность детали при совместном формовании. Поверхностная плотность таких сеток составляет от 80 до 400 г/м^2 .

На рис. 3 приведен образец углепластика с нанесенным металлическим молниезащитным покрытием в виде бронзовой сетки с поверхностной плотностью 320 г/м^2 после воздействия тока с параметрами $I=200$ кА, $Q=20$ Кл.

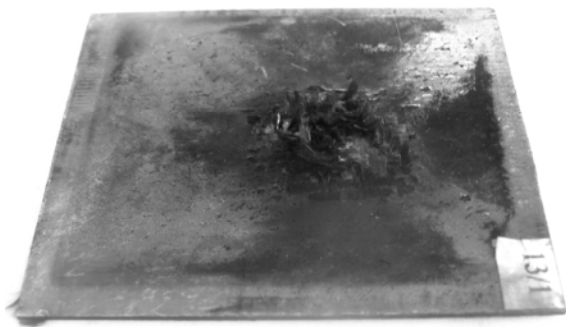


Рис. 3. Образец углепластика на основе углеродного наполнителя Элур-0,1П и связующего ВС-2526к с МЗП на основе бронзовой сетки с поверхностной плотностью 320 г/м^2 после воздействия тока с параметрами $I=200 \text{ кА}$, $Q=20 \text{ Кл}$

новения коррозионных процессов на границе раздела «углепластик–металл».

Таким образом, практически ни одна из вышеперечисленных молниезащитных систем не отвечает в полной мере требованиям норм летной годности по молниестойкости, весовой эффективности, аэродинамическим характеристикам, эксплуатационной надежности.

В ВИАМ разработана концепция создания молниезащитного покрытия конструкционных углепластиков на основе углеродных тканей, включающая:

- дробление канала молнии между узлами переплетения углеродного наполнителя благодаря возникновению нескольких точек привязки;
- создание многовекторности рассеяния тока молнии в покрытии путем задействования нескольких поверхностных слоев равнопрочной армирующей ткани, ориентированных под некоторым углом друг к другу;
- придание трансверсальной тепло- и электропроводности молниезащитным слоям при помощи электропроводящих наномодификаторов;
- минимизация влияния матрицы как диэлектрика путем введения в состав наномодификаторов;
- повышение упруго-прочностных свойств материала (особенно в трансверсальном направлении) благодаря модификации связующего наночастицами;
- повышение термостойкости матрицы и материала путем введения наномодификаторов и применения тепло- и термостойких связующих;
- снижение массы изделия благодаря включению МЗП в расчетную схему несущей конструкции;
- исключение коррозионных процессов на границе «конструктивная часть изделия–МЗП».

Предложенная концепция использована при разработке МЗП, в котором ток молнии в значительной степени отводится поверхностными токопроводящими слоями, протекает по всему объему покрытия (в первую очередь вдоль углеродных волокон ткани), а также частично в трансверсальном направлении по полимерной матрице, содержащей углеродные наночастицы (УНЧ), и вдоль второго проводящего слоя. Расположение токопроводящих слоев углеродной ткани друг относительно друга под углом 45° способствует многовекторному рассеиванию электрического тока. Высокая термостойкость полимерной матрицы с углеродными наночастицами определяет работоспособность токопроводящего слоя в качестве конструкционного и молниестойкого материала одновременно, так как при воздействии высоких тепловых энергий, выделяю-

Применение молниезащитных покрытий на основе металлических сеток существенно снижает размер поражения конструкций из углепластиков. Разрушение заключается в сублимации металлического покрытия на площади $30 \times 35 \text{ мм}$, эрозии связующего в 2–3-х верхних слоях углепластиковой конструкции, что по сравнению с результатом испытаний незащищенного образца является значительным преимуществом.

Однако следует учитывать, что при нанесении данной молниезащиты масса 1 м^2 конструкции из углепластика увеличивается, возрастает опасность возник-

щихся в процессе прохождения электрического тока молнии, увеличивается степень сохранения молниезащитного покрытия и конструкции в целом. В результате прохождения тока молнии по двум токопроводящим слоям плотность его снижается в 3–4 раза, а удельное энерговыделение в 4–5 раз, что, в свою очередь, значительно снижает локальное разрушение молниезащитного покрытия – наблюдается лишь эрозия связующего и незначительное распушение углеродных волокон верхнего токопроводящего слоя, что обеспечивает целостность углепластиковых конструкций от разрушения.

Основной задачей для обеспечения молниезащищенности конструкций из полимерных композиционных материалов при помощи молниезащитного покрытия на основе углеродных наполнителей и полимерных связующих, модифицированных наночастицами, является выбор углеродного наполнителя, термостойкого связующего, наномодификаторов и их соотношения.

Для дополнительного ускорения рассеивания тепловой и электрической энергии молниевых разрядов в слоях молниезащитного покрытия применяется специальное ориентирование слоев углеродной ткани УТ-900-3к под углом 45 град друг относительно друга.

В настоящее время авиастроительные предприятия используют для изготовления самолетов различные полимерные связующие с низкой тепло- и термостойкостью, основываясь только на эксплуатационных факторах, и не принимают в расчет такие экстремальные ситуации, как поражение молниевым ударом. Так, для изготовления деталей и агрегатов рядом предприятий используются, например, клеевая матрица ВК-3брт и эпоксидные связующие ЭНФБ и ЭНФБ-2М из-за высокой технологичности и большой жизнеспособности препрега. Но результаты исследований на молниестойкость углепластиков на основе этих связующих показали, что молниестойкость возрастает в ряду ВК-3брт→ЭНФБ-2М→ВС-2526к с ростом температуры стеклования и температуры начала деструкции матрицы в углепластиках.

По результатам исследований молниестойкости полимерных композиционных материалов на основе связующих ВК-3брт, ЭНФБ, ЭНФБ-2М и ВС-2526к было установлено, что лучшей молниестойкостью обладают углепластики на основе термостойкого эпоксидного связующего ВС-2526к, с температурой начала деструкции $>380^{\circ}\text{C}$ и температурой стеклования $\geq 195^{\circ}\text{C}$.

Модификация термостойкого связующего ВС-2526к углеродными наночастицами проводится с целью повышения трансверсальной электропроводности между отдельными слоями углеродной ткани и минимизации диэлектрического влияния матрицы на тепло- и электропроводящие свойства молниезащитного покрытия [4]. В ходе исследований установлено, что введение в полимерную матрицу углеродных наномодификаторов – фуллеренов, астраленов и нанотрубок – позволяет не только увеличить трансверсальную электропроводность между слоями углеродной ткани, но и число направлений рассеивания энергии электрического разряда. Лучшие результаты по повышению физико-механических, тепло- и электропроводящих характеристик получены в случае применения в качестве наномодификаторов оптимального количества астраленов [5]. Этот эффект наблюдается в случае введения в состав полимерной матрицы фуллеренов, астраленов и углеродных нанотрубок и зависит от вида наночастиц и их концентрации в полимерной матрице.

Полимерную матрицу в угленанокompозите следует рассматривать как дисперсию случайно расположенных в диэлектрике проводящих частиц, к которой применима теория перколяции и общие вероятностно-статистические подходы при описании явлений переносов в неупорядоченных полупроводниках с позиции теории протекания [4]. Согласно этой теории высокая проводимость полупроводника возникает, когда концентрация про-

водящих частиц в диэлектрике становится выше определенного порогового значения, соответствующего образованию в гетерогенном материале непрерывной системы контактирующих проводящих частиц. В данном случае концентрация проводящих наночастиц в полимерной матрице заведомо ниже порогового значения проводимости. При такой концентрации случайно распределенных наночастиц в полимерной матрице отсутствуют проводящие цепи, состоящие из контактирующих проводящих наночастиц – астраленов. В этом случае механизм проводимости включает в себя инжекцию электронов, длина свободного пробега которых соизмерима с размерами наночастиц. Туннелирование электронов увеличивается с ростом температуры, этому способствует поляризуемость диэлектрика и самих астраленов, тепловые флуктуации атомов и ионов матрицы, снижение толщины прослойки полимерной матрицы с ростом числа распределенных в ней частиц вследствие их наноразмерности.

Поскольку механизмы электро- и теплопроводности полимерных композитов с матрицей, наполненной проводящими наночастицами, достаточно близки, то это объясняет увеличение в трансверсальном направлении электропроводности в 3 раза и коэффициента теплопроводности с 1,5 до 2,54 Вт/(м·К) в слоях МЗП, наполненных наночастицами астралена HTS.

Применение разработанного молниезащитного покрытия на основе равнопрочных тканей саржевого плетения марки УТ-900-3к либо ее зарубежного аналога фирмы «Porcher» (арт. 3692) и термостойкого эпоксидного связующего ВС-2526к, модифицированного оптимальным количеством наночастиц – астраленов, приводит к устранению сквозного пробоя материала конструкции из углепластика и снижению площади повреждения (табл. 2).

Таблица 2

Типичные разрушения образцов углепластиков толщиной 2,0–2,5 мм и образцов углепластиков с МЗП после воздействия высоковольтного разряда с параметрами тока $I=200$ кА, $Q=20$ Кл

Материал	Характер повреждения
Углепластик Элур-01П/ВС-2526к без МЗП	Сквозной пробой материала диаметром 3–5 мм; сквозные трещины во взаимно перпендикулярном направлении длиной 20–30 мм; расщепления и унос 4–6 поверхностных слоев; расслоение материала на площади до 90 мм
Углепластик УТ-900/ЭНФБ-2М без МЗП	Сквозной пробой материала с образованием взаимно перпендикулярных трещин длиной 10–20 мм; обессмоливание; разрушение жгутов и отдельных волокон; разрушение на площади диаметром 35–40 мм; расслоение материала на площади диаметром до 50 мм; точечный прогар связующего на площади диаметром до 70 мм
Углепластик УТ-900/ЭНФБ-2М с МЗП УТ-900/ВС-2526к или 3692/ВС-2526к	Отсутствие сквозного пробоя и растрескивания материала; обессмоливание верхнего слоя МЗП (эрозия связующего) на площади диаметром 15–30 мм; разрушение отдельных волокон в жгутах верхнего слоя МЗП и его отслоение на площади диаметром 10–15 мм
Углепластик 3692/ЭНФБ-2М с МЗП из бронзовой сетки с поверхностной плотностью 320 г/м ²	Отсутствие сквозного пробоя и растрескивания основного материала; расплавление и разрывы бронзовой сетки длиной 40–60 мм; обессмоливание и отслоение верхнего основного материала; разрушение и распушение отдельных волокон в жгутах; расслоение основного материала на площади диаметром 40–60 мм

При использовании предложенной защиты ток молнии в значительной степени отводится поверхностным токопроводящим слоем, где протекая по его (слоя) объему, в первую очередь, вдоль углеродных волокон ткани, а также частично по полимерной матрице в трансверсальном направлении, проникает в следующие слои МЗП, создавая таким образом многовекторность рассеивания. В результате прохождения тока молнии по двум токопроводящим слоям плотность его снижается в 3–4 раза, а удельное энерговыделение уменьшается в 4–5 раз, что, в свою очередь, значительно сокращает локальное разрушение молниезащитного покрытия и соответственно разрушение несущей части конструкции.

Образец с МЗП на основе отечественной ткани УТ-900-3к и связующего ВС-2526к, модифицированного астраленами, представлен на рис. 4.

Следует отметить, что в отличие от приведенных выше примеров разрушений полимерных композиционных материалов после воздействия молнии, внешние стороны образца имеют локализованные повреждения в виде эрозии связующего размером 25×25 мм, причем обратная сторона образца не имеет следов пробоев и прогаров.

Анализ результатов экспериментальных исследований показал преимущества МЗП на основе углеродных наполнителей и связующего, модифицированного наночастицами, перед наиболее распространенными МЗП на основе бронзовых сеток:

- снижение площади поражения до 25×25 мм (эрозия связующего);
- отсутствие увеличения массы конструкции при нанесении МЗП на основе углеродного наполнителя с наночастицами (при нанесении бронзовой сетки привес составляет 320 г/м²);
- исключение протекания коррозионных процессов на границе раздела «бронзовая сетка–углепластик»;
- включение слоев МЗП с наночастицами в силовую схему конструкции изделия (механические свойства МЗП аналогичны свойствам углепластика силовой части конструкции, а МЗП из бронзовой сетки используется только для обеспечения молниезащиты);
- возможность проведения ремонта МЗП с УНЧ в случае поражения молнией (восстановить сплошность и, как следствие, электропроводность МЗП из бронзовой сетки практически невозможно);
- сохранение прочности монолитной конструкции на уровне 66–80%.

Таким образом, обоснована необходимость применения в качестве молниезащитных покрытий (МЗП) углепластиков, содержащих в своем составе наночастицы.

Определены преимущества молниезащитного покрытия на основе углеродных наполнителей и связующего, модифицированного наночастицами, перед аналогом МЗП на основе бронзовых сеток.

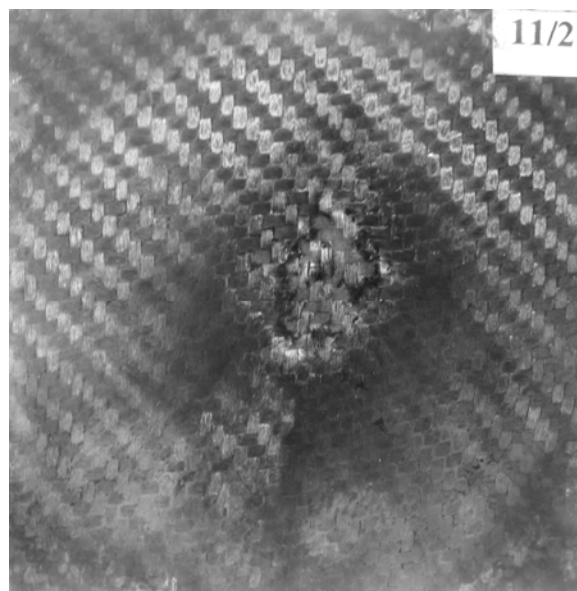


Рис. 4. Образец углепластика на основе ткани УТ-900-3к и связующего ВС-2526к с МЗП на основе той же ткани и связующего ВС-2526к, модифицированного астраленами, после воздействия тока с параметрами $I=200$ кА, $Q=20$ Кл

ЛИТЕРАТУРА

1. Гуняев Г.М., Митрофанова Е.А., Ярцев В.А., Сорина Т.Г., Соболевская Е.Г. Молниестойкость углепластиков /В сб. Вопросы авиационной науки и техники. Сер. Авиационные материалы. Вып. «Неметаллические композиционные материалы». М.: ВИАМ. 1986. С. 79–84.
2. Гуняев Г.М., Митрофанова Е.А., Ярцев В.А., Сорина Т.Г., Соболевская Е.Г., Ларионов В.П., Агапов В.Г., Сергиевская И.М. Молниезащита высокомодульных полимерных композиционных материалов //Авиационная промышленность. 1985. №10. С. 44–48.
3. Гуняев Г.М., Митрофанова Е.А., Ярцев В.А., Соболевская Е.Г. Молниестойкость углепластиковых конструкций /В сб. «Авиационные материалы на рубеже XX–XXI веков». М.: ВИАМ. 1994. С. 595–599.
4. Многослойное молниезащитное покрытие: пат. №2217320 Рос. Федерации; опубл. 27.11.03.
5. Гуняев Г.М., Каблов Е.Н., Алексашин В.М. Модифицирование конструкционных углепластиков углеродными наночастицами //Российский химический журнал. 2010. Т. IIV. №1. С. 5–11.

REFERENCES LIST

1. Gunjaev G.M., Mitrofanova E.A., Jarcev V.A., Sorina T.G., Sobolevskaja E.G. Molniestojkost' ugleplastikov [Lightning-resistance of carbon fibers] /V sb. Voprosy aviacionnoj nauki i tehniki. Ser. Aviacionnye materialy. Vyp. «Nemetallicheskie kompozicionnye materialy». M.: VIAM. 1986. S. 79–84.
2. Gunjaev G.M., Mitrofanova E.A., Jarcev V.A., Sorina T.G., Sobolevskaja E.G., Larionov V.P., Agapov V.G., Sergievskaja I.M. Molniezashhita vysokomodul'nyh polimernyh kompozicionnyh materialov [Lightning protection high-modulus polymer composites] //Aviacionnaja promyshlennost'. 1985. №10. S. 44–48.
3. Gunjaev G.M., Mitrofanova E.A., Jarcev V.A., Sobolevskaja E.G. Molniestojkost' ugleplastikovyh konstrukcij [Lightning-resistance of CFRP structures] /V sb. «Aviacionnye materialy na rubezhe XX–XXI vekov». M.: VIAM. 1994. S. 595–599.
4. Mnogoslojnoe molniezashhitnoe pokrytie [Lightning-resistant multilayer coating]: pat. №2217320 Ros. Federacii; opubl. 27.11.03.
5. Gunjaev G.M., Kablov E.N., Aleksashin V.M. Modificirovanie konstrukcionnyh ugleplastikov uglerodnymi nanochasticami [Modification of structural carbon fiber with carbon nanoparticles] //Rossijskij himicheskij zhurnal. 2010. T. IIV. №1. S. 5–11.