

УДК 621.762

Л.Р. Вишняков, д.т.н.,  
И.И. Чернявский, О.В. Зубков**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ МОЛНИЕЗАЩИТЫ ПОЛИМЕРНЫХ  
КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ, АРМИРОВАННЫХ МЕДНОЙ  
ВЯЗАНОЙ СЕТКОЙ**Институт проблем материаловедения им. И.Н. Францевича НАН Украины, Украина, г. Киев,  
email: leonvish@ipms.kiev.ua

*Рассмотрены процессы, возникающие в полимерном композиционном материале (ПКМ) при прямом попадании в него молнии. Приведены данные по характеру разрушения ПКМ при протекании в нем больших импульсных токов, сопровождающих удар молнии. Описана эффективность использования вязаных и вязано-паяных проволочных сеток в качестве токоотводящего элемента ПКМ. Рассмотрены преимущества использования пайки петель сетчатого полотна, для придания сетке диссипативных свойств. Приведены амплитудно-временные параметры тока имитированной молнии и обсуждены предпосылки для создания физической модели молниезащиты ПКМ с сетчатыми токоотводами.*

**Ключевые слова:** углепластик, молния, электротепловое разрушение, молниезащита, модель разрушения, полимерные композиты, медная сетка.

**Введение.** В современной технике и, особенно в авиации и ветроэнергетике, широкое применение получили полимерные композиционные материалы на основе углеродных волокон с эпоксидной матрицей. Объем использования углепластиков в гражданских самолетах расширяется и достигает, например, в АН-148 – 20-22 %, а в самолетах мировых авиационных производителей (Boeing-787, Airbus-350 и др.) доведен до 60 % [1].

Конструкции из углепластиков имеют ряд преимуществ по сравнению с металлическими, такие, как малый вес, высокие упруго-прочностные характеристики, низкая трудо- и энергоёмкость изготовления и др. Однако их существенным недостатком является низкая электро- и теплопроводность. В связи с этим при воздействии термических и электрических нагрузок при прямом попадании молнии на полимерный композит в нем возникают повреждения в виде сквозных отверстий и расслоений на значительной площади вокруг места контакта с каналом молнии (рис. 1).

Мировые изготовители авиационной техники и ветроагрегатов эту проблему пытаются решить за счёт металлизации поверхности углепластиков, подверженных ударам молнии, в частности, путём наформовки на них перфорированных и просечных медных и алюминиевых фольг, напылением металлических покрытий или применением сеток из тонких металлических проволок [2, 3].



Рис. 1. Повреждения после прямых ударов молнии:  
а) ветролопасть; б) панель гражданского самолета

Цель работы состоит в описании особенностей применения медных вязаных сеток в качестве армирующих элементов поверхностных слоев углепластиков и изучении поведения полимерных композиционных материалов при воздействии на них молнии.

При протекании больших импульсных токов (до 200 кА), сопровождающих удар молнии,

происходит быстрое нагревание ПКМ. За доли секунды углепластик нагревается до нескольких сотен градусов, что приводит к интенсивному газообразованию за счет деструкции связующего. Образовавшийся газ не успевает выйти через слои композита и создает в объеме ПКМ высокое внутреннее давление и, как следствие, происходит отрыв слоев углепластика, и его разрушение.

Удельное электрическое сопротивление ПКМ (углепластика) имеет разные значения при протекании тока вдоль и поперек слоев, отличающихся различной ориентацией углеродных волокон. Обычно удельное сопротивление углепластика имеет значение от  $1-2 \cdot 10^3$  Ом·см (для однонаправленного армирования углеволокном) до значений 10-100 Ом·см (для поперечного волоконкам направления) [2].

Термоэлектрический анализ поведения изделий из ПКМ был проведен в работе [4]. Композит состоял из 32 слоев углеволокна (производства Toho Tenax Co. Ltd.) и эпоксидной смолы. Образцы композита

толщиной 4,7 мм были подвергнуты воздействию электрическими зарядами с пиковой нагрузкой 40 кА. Целью этих исследований было определение характера разрушения ПКМ и процессов, которые происходят в толщине композита при прохождении имитированных токов молнии [4].

Было отмечено, что процесс прохождения высоких токов через ПКМ сопровождается выделением Джоулева тепла, вследствие чего в ПКМ происходит интенсивная сублимация углерода и потеря массы композита. На основании полученных данных в [4] было предложено несколько моделей разрушения ПКМ, которые схематически показаны на рис. 2 и 3.

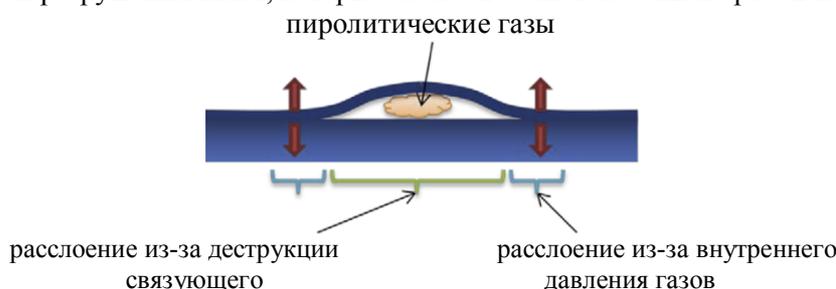


Рис. 2. Модель разрушения ПКМ при диэлектрическом пробое пиролитических газов в межслоевом пространстве

Исследования в работе [5] показали, что разрушение углеродных волокон и связующего, а также зона расслоения ПКМ существенно не зависит от размеров образцов и их толщины.

При этом, проведенные в [5] исследования разрушенных образцов ПКМ ультразвуковым и рентгеновским методом позволили определить максимальную площадь и глубину разрушения. Было установлено, что площадь и глубина разрушения имеет практически линейную



Рис. 3. Модель разрушения поверхности ПКМ за счёт сублимации углерода

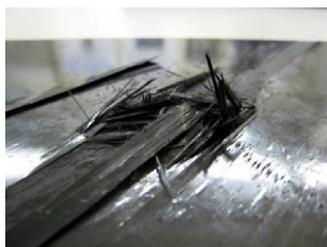


Рис. 4. Изображение разрушенного полимерного образца разрядом тока имитированной молнии

зависимость от приложенного тока. При увеличении тока от 20 до 40 кА, площадь разрушения увеличивается от 100 до 600 мм<sup>2</sup>, а глубина разрушения увеличивается от 0,9 до 1,4 мм.

В настоящее время разрабатываются различные способы защиты от прямых ударов молнии, которые, главным образом, состоят в образовании на поверхностях ПКМ токоотводящего металлического

слоя в виде сплошной и перфорированной фольги марок дексмет [6], астрострайк [7] и др., выпускаемых американскими компаниями, а также вязаных и тканых проволочных сеток или нанесения на поверхность ПКМ металлизированных покрытий.

Одним из перспективных способов создания металлизированных слоёв является применение легких вязаных сеток, которые наформовуют на поверхность деталей из ПКМ [8]. Петельная структура таких сеток образована тонкими медными проволоками диаметром 0,07-0,12 мм.

Как отмечено в [8], для медных трикотажных сеток, используемых в качестве токоотводов, лучшими структурными характеристиками обладают кулирные переплетения типа «ластик», (рис. 5). Оно имеет строение двухлицевого полотна (с лицевыми и изнаночными петлями) и изготавливается по производительной технологии вязания.

Было установлено [1], что сетки из тонкой медной проволоки диаметрами 0,07-0,12 мм являются эффективным конструктивным элементом, создающим надежную защиту от влияния разрядов молнии. В частности, сетки трикотажной структуры отличаются высокой эластичностью, которая создает требуемую технологичность при наформовке их на детали сложной геометрической формы. При этом они хорошо закрепляются связующим в поверхностном слое ПКМ, а при ударе молнии рассеивают действующие токи и тепловую нагрузку, предотвращая разрушение внутренних слоев углепластика. Весьма эффективным является применение вязано-паяных сеток, в которых на медные



Рис. 5. Медная сетка трикотажной структуры типа «ластик»

проволоки предварительно наносят легкоплавкое покрытие, а контакты между смежными петлями соединяют пайкой. При нагреве током молнии легкоплавкий припой испаряется, а петли рассоединяются, уменьшая тепловую и механическую нагрузку на ПКМ [1, 8].

Для снижения электросопротивления сеток за счет создания надежных электрических контактов, особенно в продольном направлении сетчатого полотна, было предложено использовать медную проволоку, покрытую легкоплавким оловянно-свинцовым припоем. Также луженые проволоки оказались наиболее подходящими для создания высокой проводимости.

Из существующих легкоплавких припоев для изготовления покрытия медной проволоки был выбран припой ПОС-61, поскольку по сравнению с другими припоями этой группы он имеет наименьшую плотность, низкое удельное электросопротивление и наиболее высокую прочность (табл. 1) [8, 9].

Путем дальнейшей пайки петельных ячеек такой сетки образуется проволоочный каркас, сохраняющий форму трикотажных петель. В отличие от вязаных непаяных сеток, молниеотводные каркасы из паяных сеток имеют меньшую растяжимость, а подвижность элементов структуры такого полотна сохраняется за счет деформации и смещения петель относительно друг друга.

Таблица 1

Физические и механические свойства легкоплавких оловянно-свинцовых припоев [9]

Марка припоя	Плотность, $\gamma$ , г/см <sup>3</sup>	Удельное электросопротивление, $\rho$ , Ом·мм <sup>2</sup> /м	Предел прочности, $\sigma_b$ , МПа	Относительное удлинение, $\delta$ , %	Ударная вязкость, $\alpha_H$ , кГс/см <sup>2</sup>	Твердость, НВ
ПОС-61	8,54	0,145	47	34,0	3,8	12,6
ПОС-50	8,90	0,156	38	54,0	4,59	14,9
ПОС-40	9,31	0,170	38	52,0	4,75	13,7

Эксперименты по определению удельного поверхностного электрического сопротивления медных сеток проводились с использованием универсального вычислительного прибора Р4833. Было установлено, что удельное поверхностное сопротивление медных сеток с увеличением поверхностной плотности (что равноценно увеличению количества проводящих петель) уменьшается, поскольку увеличивается удельная площадь проводников. Эти зависимости имеют практически линейный характер (рис. 6). При этом было определено, что пайка петельных контактов сетки уменьшает ее удельное поверхностное электрическое сопротивление почти в 4 раза.

Однако, при выборе типа медной сетки, как элемента молниезащиты, следует учитывать также, что с увеличением поверхностной плотности растет удельный вес использованной медной сетки. Для более тщательного изучения процессов релаксации механической составляющей молнии был проведен ряд экспериментов по определению усилия растяжения и относительной деформации сеток.

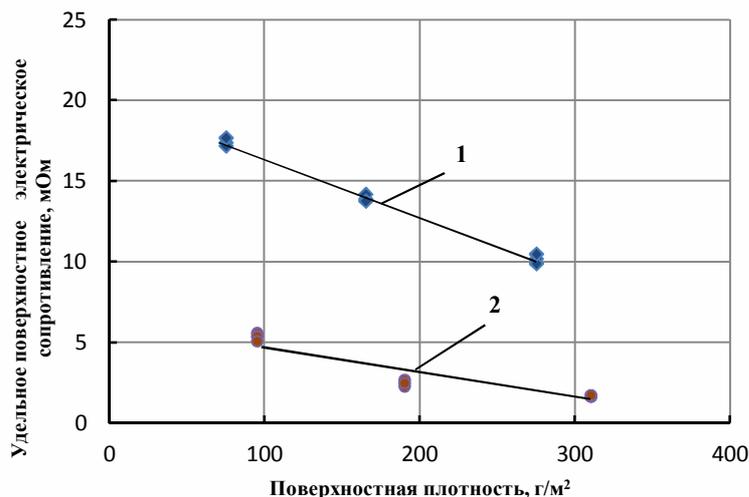


Рис. 6. Зависимость удельного поверхностного электрического сопротивления от поверхностной плотности вязаных (1) и вязанопаяных (2) сеток из медной проволоки диаметром 0,08 мм

пропаянных образцах и тем, что материал припоя разрушаясь берет часть нагрузки на себя.

На рис. 7 представлены зависимости усилия и относительной деформации от поверхностной плотности сеток при растяжении. Эксперименты на разрыв образцов медных сеток проводились на разрывной машине 2166 Р-5, при температуре 20 °С. Скорость рабочего хода активного захвата была 1 мм/с.

Исходя из вышеуказанных линейных зависимостей можно сделать вывод о том, что пайка в местах контактов петель незначительно увеличивает прочность сетки, однако понижает её деформируемость. Это вызвано увеличением площади контакта в

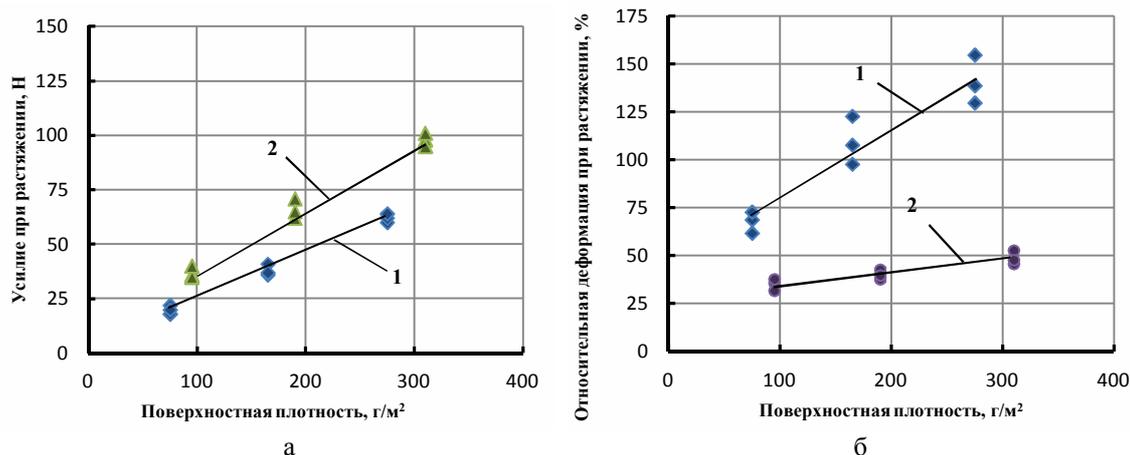


Рис. 7. Зависимость усилия при растяжении (а) и относительной деформации (б) при растяжении вязаных (1) и вязано-паяных (2) сеток из медной проволоки диаметром 0,08 мм

При этом, эксперименты по определению механических и электрофизических свойств сеток являются аппроксимацией их поведения в композите, так как исследования проводились без учета влияния повышенных температур, которые сопровождают удар молнии.

Также следует отметить, что процесс испарения припоя с неразъемных соединений, образованных петлями смежных рядов, способствует плавному ослаблению механической связи между соединенными проводами. В результате этого провода могут легче разъединиться между собой и увеличивать эффект релаксации механических напряжений в макрообъемах покрытия, что значительно уменьшает повреждение материала панели.

Отмеченные особенности поведения при нагрузке вязано-паяных сеток объясняют возможность их полезного целевого использования для молниезащиты ПКМ в конструкциях как самолетов, так и ветролопастей. Чтобы снизить влияние механической составляющей удара молнии, когда усилия разрушения сетки превышают прочность на сдвиг материала припоя, неразъемные контакты между петлями сетки ослабляются и разрываются, а освободившиеся петли, деформируясь, берут часть нагрузки на себя. Этому способствует также и испарение припоя с мест контактов проводных петель. В результате макродвижения структуры снижается повреждаемость ПКМ, а расслоение материала в месте попадания молнии существенно уменьшается [8].

Полный разряд молнии представляет комплексное физическое явление, которое сопровождается не только тепловым, но также электромагнитным и электродинамическим разрушающим действием. Эти факторы весьма сложно искусственно смоделировать в отдельности, поэтому при разработке новых систем молниезащиты образцы ПКМ подвергают испытаниям на высоковольтных электрофизических стендах, где можно имитировать полный ток молнии и точно фиксировать условия и последствия проводимых разрядов [2]. Требования к объему и параметрам испытаний фрагментов обшивки летательного аппарата на прямое воздействие тока молнии регламентируется рядом инструкций, в

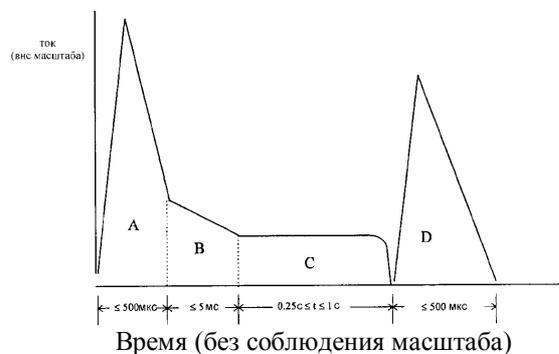


Рис. 8. Испытательный импульс тока молнии  $i_M(t)$ .

молнии  $i_M(t)$ , соответствующие нормативным требованиям, приведены в табл. 3.

в которых для оценки стойкости от прямого воздействия молнии предложено использовать нормированный импульс тока (НИТ) (рис.8). НИТ включает 5 токовых составляющих: **A** (импульс тока первого обратного разряда), **B** (промежуточный ток), **C** либо **C\*** (постоянный ток) и **D** (ток повторного разряда) [2].

В зависимости от того, в каком месте на поверхности конструкции самолета расположена тестируемая конструкция, на нее могут воздействовать импульсами тока, содержащими компоненты НИТ в различных комбинациях. Эти комбинации представлены в табл. 2, а нормированные параметры компонент тока

Таблица 2

Применение условий воздействия молнии по зонам летательного аппарата\*

Зона на летательном аппарате	Компонент(ы) тока
1А	А, В, С*
1В	А, В, С, D
2А	D, В, С*
2В	D, В, С

Таблица 3.

Амплитудно-временные параметры компонент тока молнии

Компонента тока	Максимальный ток $I_m, кА$	Средний ток $I_{cp}, кА$	Заряд $Q, Кл$	Интеграл действия $J_d, А^2 \cdot с$	Длительность фронта $\tau_{ф}, мкс$	Длительность компоненты $\tau_w, мкс$
A	200±10%	–	–	$2 \cdot 10^6 \pm 20\%$	≤50	≤500
B	–	2±20%	10±10%	–	–	$5 \cdot 10^3 \pm 10\%$
C	0.2–0.8	–	200±20%	–	–	$(0.25-1) \cdot 10^6$
C*	–	0.4	–	–	–	$(20-50) \cdot 10^3$
D	100±10%	–	–	$0.25 \cdot 10^6 \pm 20\%$	≤25	≤500

Кроме токовых показателей, моделирующий импульс полномасштабного разряда молнии характеризуется интегралом действия  $J_d$ , который определяется из выражения  $J_d = \int_{t_1}^{t_2} i_m^2(t) dt$ , где  $t_1-t_2$  интервал времени, соответствующий нормам длительности действия компонент тока молнии. Важной характеристикой разряда является также электрический заряд  $Q$ , переносимый за время действия соответствующей компоненты –  $Q = \int_{t_1}^{t_2} i_m(t) dt$  [2].

**Предпосылки к проведению электротепловых расчетов молниезащиты ПКМ, поверхностно-армированных медной сеткой.** Электротепловые расчеты воздействия прямого удара молнии (ПУМ) на ПКМ с конструктивными элементами молниезащиты в виде вязанных проволочных сеток из тонкой медной проволоки представляют практический интерес.

В работе [10] была выполнена численная оценка результатов электротеплового воздействия ПУМ на стенку металлической обшивки летательного аппарата (ЛА). С учетом принятых допущений количество электричества, переносимое при ПУМ в металлическую обшивку ЛА сильноточным каналом молнии, контактирующим с ее наружной поверхностью, рассчитывался следующим образом:

$$Q_0 = Q_1 + Q_2 + Q_3, \quad (1)$$

где  $Q_1, Q_2$  и  $Q_3$  – электрический заряд, протекающий через канал молнии за время действия соответственно импульсной (компонента тока А), промежуточной (компонента тока В) и постоянной (компонента тока С) составляющих тока молнии. В результате суммарный электрический заряд  $Q_0$ , оказался равным  $Q_0 = 13,84 + 10 + 200 = 223,84 Кл$ .

Численный расчет электротеплового воздействия молнии на металлическую обшивку был представлен в виде круглого кратера разрушения наружным радиусом  $r_0$ , с высотой  $h_0$  и внутренним радиусом  $R_0$  (рис. 9).

В [11] для расчета было использовано выражение для объема  $V_0$  материала обшивки ЛА, уносимого из шарового сегмента кратера электротеплового разрушения:

$$V_0 = 0,5\pi r_0^2 h_0, \quad (2)$$

где  $r_0 = 0,093(I_m)^{1/3} (t_m)^{1/2}$  – максимальный радиус

сильноточного канала молнии;  $t_m = \frac{\ln \alpha 2/\alpha 1}{(\alpha 2 - \alpha 1)}$  – время, соответствующее амплитуде  $I_m$  импульсной составляющей тока молнии;  $h_0$  – глубина кратера разрушения на поверхности металлической обшивки ЛА.

Объем  $V_0$  ( $м^3$ ) сублимируемого материала стенки металлической обшивки ЛА при ПУМ также приводили в следующем виде:  $V_0 = \frac{10Q_0}{w_c}$ , (3)

где  $W_c$  – удельная энергия сублимации, равная количеству теплоты, необходимому для

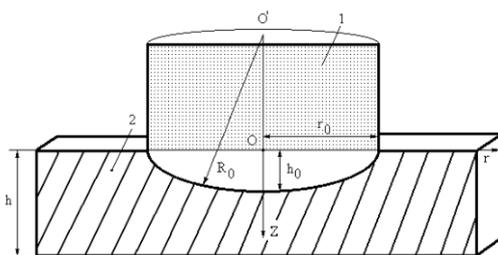


Рис. 9. Схема кратера электротеплового разрушения

перевода единицы объема материала металлической обшивки ЛА в металлический пар.

Тогда с учетом (3) масса  $M_0$  (кг) уносимого материала с поверхности металлической обшивки ЛА за один сильноточный разряд в нее молнии была найдена из следующего выражения:

$$M_0 = \frac{10d_0Q_0}{W_c}, \quad (4)$$

где  $d_0$  - плотность материала металлической обшивки ЛА (для алюминия  $d_0=2,71 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>).

Из (3) и (4) видно, что при ПУМ в металлическую обшивку ЛА глубина  $h_0$  и объем  $V_0$  кратера ее разрушения (проплавления) и выброс металла  $M_0$  с ее наружной поверхности прямо пропорциональны вводимому в нее из сильноточного канала молнии электрическому заряду  $Q_0$  и обратно пропорциональны значению удельной энергии сублимации  $W_c$  для ее материала [10].

Таким образом был предложен численный расчет электротеплового взаимодействия канала молнии с поверхностью металлической обшивки ЛА, пренебрегая следующими факторами: влиянием теплоотдачи в окружающую обшивку ЛА и в воздушную среду; теплопроводностью ее материала. Приведенные выражения могут быть взяты за основу при расчете электротеплового взаимодействия канала молнии с поверхностью армированного медной сеткой ПКМ.

При этом следует учесть, что взаимодействие молнии с поверхностью конструкции является мощным источником потоков энергии: излучения из канала; передачи тепла от плазмы канала к конструкции за счет теплопроводности; омического нагрева токами в окрестности дугового пятна. Учет этих факторов является сложной технической задачей, которую мы собираемся решать в последующих исследованиях.

### Выводы

1. Полимерные композиционные материалы на основе углеродных волокон с эпоксидной матрицей получили широкое применение в современной промышленности, особенно в авиации и ветроэнергетике. Однако при попадании молнии в углепластиковые конструкции существует риск разрушения, за счет их низкой электропроводности.

2. В работе представлены процессы, которые описывают поведение углепластиков при попадании в них молнии. Одним из возможных методов молниезащиты таких конструкций является создание металлизированного слоя из медных вязаных и вязано-паяных сеток.

3. Исследованы механические и электрофизические характеристики сеток, которые будут использованы для практических применений. Представлен пример электротеплового расчета воздействия прямого удара молнии на металлическую обшивку летательного аппарата. Существует необходимость проведения подобных расчетов для полимерных композитов с поверхностью, армированной медной вязаной сеткой.

### Список литературных источников

1. Л.Р. Вишняков, А.М.Баранников, Ю.Ф.Гринь, З.Н.Демиденко, В.С.Петропольский, В.М.Цариковский, И.И.Чернявский. Изготовление изделий из полимерных композитов, поверхностно-армированных медными трикотажными сетками // Вестник инженерной академии Украины. – 2009. – № 3-4. – С.182-186.
2. Л.Р. Вишняков, О.К. Недзельский, Ю.Ф.Гринь, И.И.Чернявский, Ю.М. Василенков. Разрядные испытания имитированным током молнии композиционных материалов с молниезащитой на основе медных вязаных сеток // Вестник инженерной академии Украины. – 2009. – № 3-4. – С.187-191.
3. Ahmad Hemami. Wind Turbine Technology / Delmar Cengage Learning. – 2011. – 1 edition. – 416 p.
4. Toshio Ogasawara, Yoshiyasu Hirano, Akinori Yoshimura. Coupled thermal-electrical analysis for carbon fiber/epoxy composites exposed to simulated lightning current // Composites. – 2010. – Part A. – № 41. – pp. 973-981
5. Yoshiyasu Hirano, Shingo Katsumata, Yutaka Iwahori, Akira Todoroki. Artificial lightning testing on graphite/epoxy composite laminate. Composites. – 2010. – Part A. – № 41. – pp. 1461-1470
6. MicroGrid and Metal Foil [Электронный ресурс] <http://www.dexmet.com/Products.html>.
7. Astroseal Products [Электронный ресурс] <http://www.astrostrike.com/index.html>.
8. А.Н.Ткаченко, Л.Р.Вишняков, К.А.Гогаев, А.В.Нешпор, И.Н.Коханая, В.А.Коханый. Медные микропровода для молниезащитных сеток трикотажной структуры // Технологические системы. – 2009. – №4. – С.16-20.
9. Осинцев О.Е., Федоров В.Н. Медь и медные сплавы. Отечественные и зарубежные марки / Справочник М.: Машиностроение. – 2004. – 336 с.
10. Баранов М.И. Расчёт кратера электротеплового разрушения на металлической обшивке летательного аппарата при прямом ударе в нее молнии // Електротехніка і Електромеханіка. – 2003. – №4. – С. 101-104.