

ЭЛАСТИЧНЫЕ СЕТЧАТЫЕ МОЛНИЕОТВОДЫ ДЛЯ ВЕТРОЛОПАСТЕЙ

ELASTIC MESH LIGHTNING RODS FOR WIND TURBINE BLADES

Л.Р. Вишняков¹, И.А. Гущин²,
В.В. Щаулов³, К.Н. Юсупов³

L.R.Vishnyakov¹, I.A.Guschin², V.V.Schaulov³,
K. N. Yusupov³

¹ООО «НПЦ «Увиком», г. Мытищи, Московская обл., Россия

²Чувашский государственный университет, г. Чебоксары, Россия,

³ООО «НПО Б ЭНД Б ИНДАСТРИЗ»

¹Uvicom Research and Production Center (carbon fibers and composites), Mytishchi, Moscow Region. Russia

²Department of Life Safety and Environmental Department, Chuvash State University, Russia, Cheboksary

³LLC «NPO B & B INDUSTRIES»

Поступила в редакцию 21.11.2023, принята к печати 20.12.2023

Абстракт

Рассмотрены общие особенности системы молниезащиты ветролопастей от прямых ударов молнии и возможные способы практической реализации молниеотводов. Обоснована необходимость применения проволочных вязано-паяных сеток в молниеприёмниках и шинах-молниеотводах. Установлена связь между строением слоистого композита и структурой сетчатого токоотвода. Приведены примеры расчёта строения молниезащитной сетки для безопасной эксплуатации ветролопастей.

Ключевые слова: ветролопасти; защита от молнии; вязано-паяная сетка; молниеприёмник; молниеотвод

Abstract

General peculiarities of a protection system for wind turbine blades from direct lightning strike and possible methods of practical design of lightning rods have been discussed. The essentiality for application of wire knitted-soldered meshes in lightning receivers and lightning rod booths was substantiated. A relationship between structure of layered composites and mesh lightning rod architecture was defined. Some calculation examples for mesh lightning rods architecture for safe exploitation of wind turbine blades have been proposed.

Key words: wind turbine blades, lightning protection system, knitted-soldered meshes, lightning receiver, lightning rod booth

Введение

Полимерные композиционные материалы (ПКМ) стали главными конструкционными материалами, позволяющими осуществлять изготовление и эксплуатацию турбин мощных ветроэлектрогенераторов. Лопастей подобных турбин изготавливают из ПКМ, в которых реализуются высокая удельная прочность углеродных армирующих волокон, а также применяются конструкционные стеклопластики. Особенностью углепластиков является их низкая по сравнению с металлами анизотропная электропроводность, что в случае применения ПКМ в ветряных агрегатах является недостатком [1], особенно при ударе молнии в углепластиковые конструкции [2–5].

Длина ветролопастей мощных агрегатов превышает 30 м, а для некоторых конструкций может достигать 100 и более метров, что делает их уязвимыми для природных молний. При импульсных пиковых токах природной молнии, где основную роль играет интеграл действия тока, быстрый нагрев и давление образовавшихся газов может приводить к деструкции композита и полному разрушению конструкции. Известны случаи возникновения возгорания и пожара при прямом ударе молнии в ветроагрегат (Рис.1).



Рис.1. Поражение ветроагрегата молнией и пожар от удара молнии

Fig.1. Damage and fire caused by a lightning strike

Ряд зарубежных исследований показывают, что несмотря на возможность попадания единичных ударов молнии в ветротурбину или летательный аппарат, при появления грозных областей с высокой плотностью ударов молнии, риск поражения объектов возрастает. Например, в США [6] за десятилетие происходят приблизительно 216 миллионов вспышек любых видов молний, а это означает, что в среднем каждый самолет поражается одним ударом молнии за 2000–5000 часов. В природных зонах ветропарков и, в частности, в оффшорных зонах (прибрежных зонах морей) интенсивная грозовая деятельность представляет большую угрозу для эксплуатации ветро-агрегатов. Установлено, что от 1 до 3 процентов ударов молнии в лопасти ветряных турбин приводят к повреждению и выходу из строя дорогостоящих агрегатов, а повреждение даже одной лопасти недопустимо. Вероятность поражения может изменяться в зависимости от местоположения ветряной электростанции, типа турбины, характеристики и направления удара молнии и других факторов [7–10].

Поскольку ветролопасти мощных турбин изготавливают из ПКМ, они требуют дополнительных систем молниезащиты [11], чтобы можно было осуществить улавливание электрических зарядов молнии и их безопасный отвод в землю. Следует отметить, что конструкция стандартной ветролопасти имеет воздушную полость, наличие которой создаёт опасность возникновения электрической дуги при сквозном пробое тела лопасти (рис. 2).

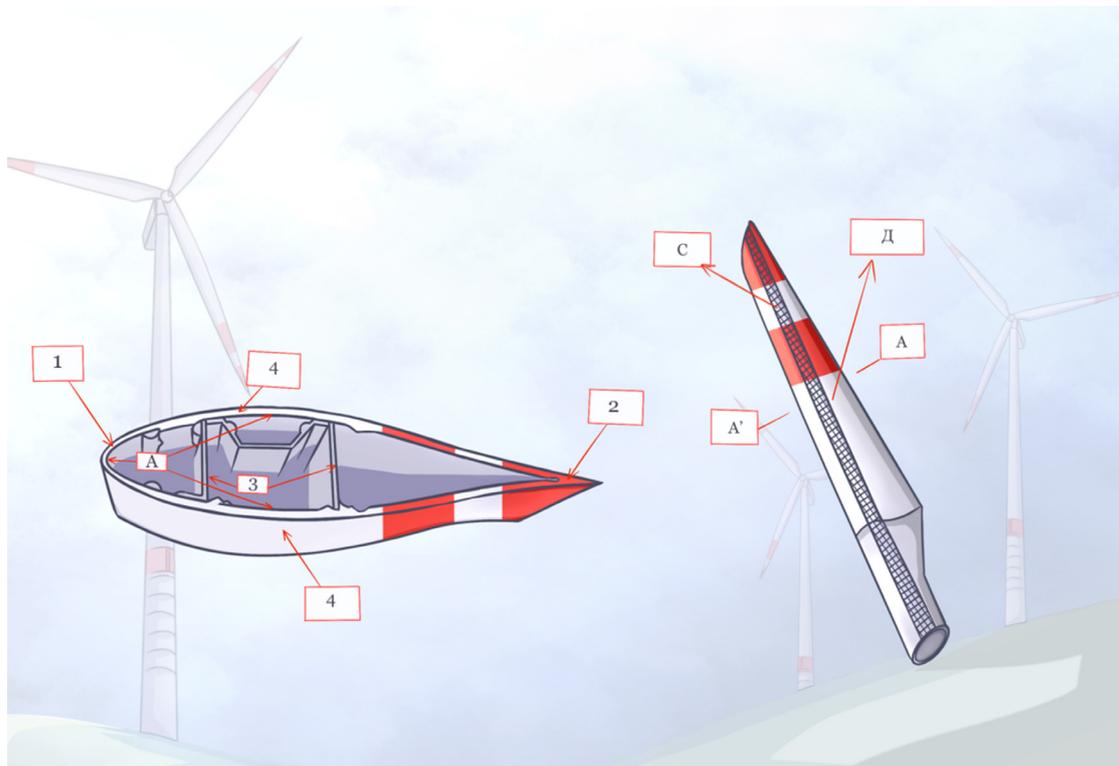


Рис.2. Стандартное сечение лопасти ветрогенератора 1 — передняя кромка; 2 — задняя кромка; 3 — лонжероны, 4 — оболочка; А — стеклоуглепластик, А-А — плоскость сечения; С — шина-молниеотвод; Д — молниеприёмник (молниеулавливатель)

Fig.2. Standart cross section of a wind turbine blade 1 – Front edge 2–rear edge 3 –spars 4 – shell; А – glassy carbon polymer А-А cross section plane, С – lightning rod booth; D – lightning receiver

Производители современных ветроагрегатов применяют различные системы молниезащиты, состоящие из молниеприемника и токоотвода. Последний в виде металлических стержней и лент обычно располагается внутри лопасти, проходя через лонжероны к заземлению конструкции. Молниеприемники (рецепторы) располагаются на внешней поверхности на вершине и боковых поверхностях и также соединяются с токоотводом. Недостатком данной системы молниезащиты является возможность появления стримеров и, как следствие, пробоя и деструкция лопасти [12]. Для исключения пробоя и появления электрической дуги с возможным возгоранием токоотвода целесообразно располагать на внешней поверхности лопасти. В другом варианте конструкции шину молниеотвода можно расположить внутри полости лопасти и приформовать её к продольной стенке лонжерона. Электрическое присоединение молниеприёмника к шине молниеотвода по всей длине ветролопасти возможно в определённых местах. Поскольку в этом варианте конструкции шина молниеотвода удалена от внутренней поверхности тела лопасти, опасность возникновения стримеров и пробоя тела лопасти незначительная.

Системы молниезащиты ветроагрегатов регулируются Международным стандартом [13]. В нем содержатся требования к оборудованию ветряных турбин и к системам молниезащиты ветролопастей, рассмотрены параметры тока молнии и уровни молниезащищенности с системами молниеотвода на поверхности лопасти или встроенной в поверхность, рекомендации по токоотводящим материалам ветролопасти.

Отметим, что для молниезащиты ветролопастей также часто используют сегментированные молниеприемники (рис.3а) в виде лент [14].

Компания Lightning Diversion Systems специально для ветряных турбин разработала прочные и долговечные ленты [15] (рис.2b), обеспечивающие максимальное время безотказной работы ветроагрегата



Рис.3. Пример сегментированных молниеприемников компании Weather Guard Lightning Tech (a) и Lightning Diversion Systems (b)
Fig.3. Samples of segmented lightning rods made by Weather Guard Lightning Tech (a) and Lightning Diversion Systems (b)

Принцип их действия основан на отводе тока молнии к молниеприемнику по созданному проводящему ионизированному каналу над лентой. Однако такая защита может значительно снизить аэродинамические характеристики лопасти и уменьшить эффективность агрегата, особенно при обледенении поверхностей.

Следует заметить, что молниеотводы на поверхности лопасти не всегда могут обеспечить достаточную площадь покрытия ПКМ. Это касается молниеотводов с поперечными металлическими полосами. Недостатком применяемых средств молниезащиты из известных проводящих материалов (медь, алюминий, сталь) является увеличение веса лопастей, низкая адгезия к современным ПКМ, коррозия при эксплуатации. Атмосферные условия способны вызвать изгиб и потерю прочности конструкции, что приведет к большим затратам. Поэтому разработчики ветроагрегатов продолжают поиск и исследование новых рациональных материалов и конструкций для обеспечения надёжной молниезащиты ветролопастей.

Результаты исследований и их обсуждение. Международный стандарт не учитывает некоторые новые технические решения, которые могут быть полезно реализованы при использовании такого эффективного электропроводного материала, как эластичные вязано-паяные проволочные сетки из тонкой медной проволоки [16]. До настоящего времени такие молниезащитные сетки ещё не нашли широкого применения в ветроэнергетике, хотя уже проведены некоторые исследования, которые показывают перспективность их применения.

Краткий анализ известных технических решений по организации молниезащиты ветролопастей показывает, что, например, применение в качестве токоотводящего материала перфорированной фольги из стали, латуни или бронзы, покрытой термопластичным изолирующим материалом, недостаточно снижает массу лопасти (по сравнению с сеткой из тонкой проволоки). Кроме того, импульсный разогрев ПКМ при ударе молнии приводит к разогреву и разрушению термопластичной изоляции такого молниеотвода. Поэтому применение медных проволочных токоотводов требует использования антикоррозионных покрытий (лужения проволоки коррозионностойким припоем), существенно увеличивающим технологичность и молниестойкость покрытия и ПКМ в целом.

Практика применения проволочных вязано-паяных сеток для молниезащиты авиационных ПКМ показывает, что весьма эффективными являются вязано-паяные медные сетки, получаемые кулирными переплетениями типа «ластик 1+1». Они представляют собой двухлицевой трикотаж из тонкой проволоки, в котором каждая изнаночная петля размещена между двух лицевых петель. Такая структура придаёт сетке достаточную эластичность, обычно свойственную трикотажному полотну. Иногда в целях снижения массы полотна некоторые его петли заменяют на линейные протяжки, получая так называемый «производный ластик» (эту структуру позволяет выполнить настройка трикотажной машины) [17].

Однако характерная для авиации однопроволочная сетка не полностью подходит к применению в ветролопастях из-за недостаточного поперечного сечения проволоч-

ного полотна для безопасного токоотвода больших импульсных токов, какие возникают в ветролопастях. Поэтому для ветролопастей оказались предпочтительными молниезащитные сетки, образованные пучком медных луженых проволок из 2–5 шт с пропайкой проволочных петель легкоплавким припоем (рис. 3).

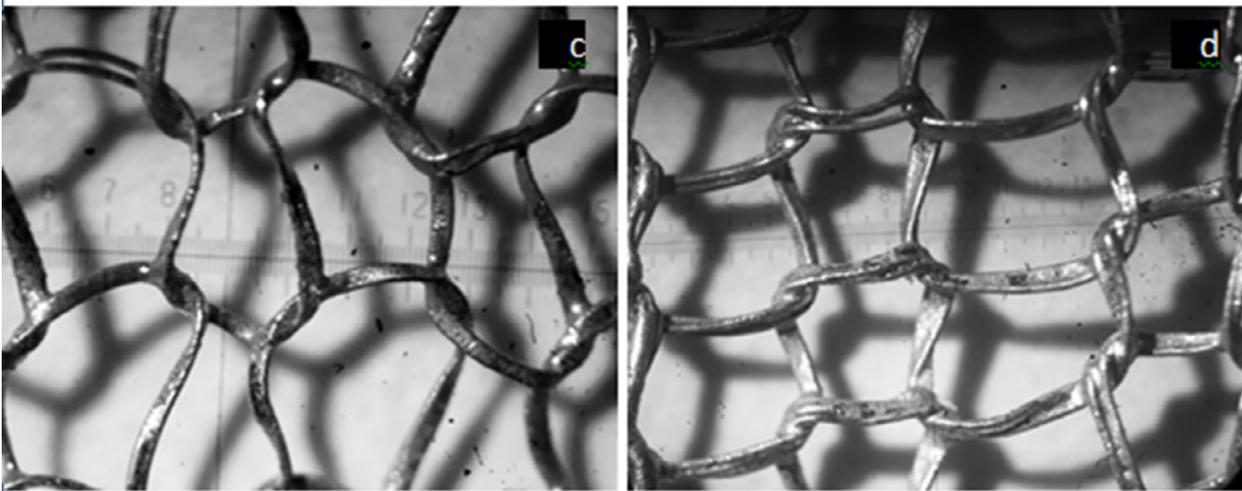


Рис.4. Вязано-паяные проволочные сетки из медной проволоки диаметром 0,12 мм с покрытием припоем ПОС-61 из двух проволок (с); из трёх проволок (d).

Fig.4. Copper wire knitted-soldered meshes of diameter of 0.12 mm coated with “ПОС-61” solder made of two wires (c) and three wires (d)

Кроме достижения коррозионной защиты, пропайка обеспечивает в сетчатом полотне эффект диссипации энергии при поражении ПКМ молнией, когда происходит расплавление и испарение припоя, рассоединение проволочных петель, их распрямление и вытягивание из связующего. Эти энергоёмкие эффекты сопровождают отвод зарядов и тепла из зоны поражения в месте попадания молнии и снижают степень разрушения ПКМ. Описанные процессы можно осуществить с помощью вязано-паяных сеток, если сетку нанести на внешнюю поверхность лопасти в качестве молниеприёмника. Тогда шины-молниеотводы располагают внутри тела композита по длине лопасти и электрически соединяют с молниеприёмником и системой заземления ветроагрегата. Материалом шины-молниеотвода может быть сетчатое полотно с той же или другой структурой, уложенное в несколько слоёв для увеличения поперечного сечения токоотвода [18]. Слои сетчатой шины могут быть пропаяны легкоплавким припоем или применены без пропайки между собой (рис.5), что позволит увеличить количество вариантов организации токоотвода в систему заземления агрегата при проектировании токоотводов ветролопасти (рис.4).

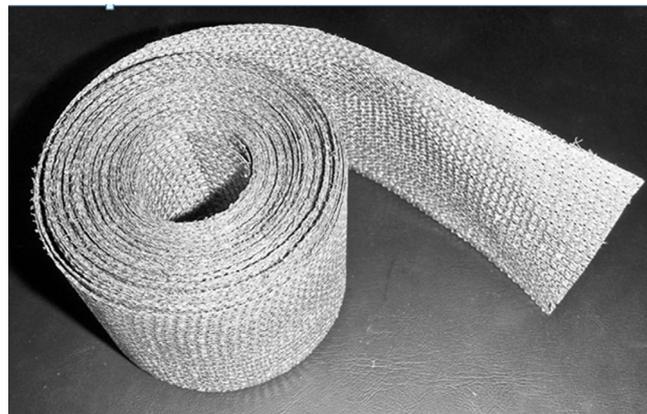


Рис. 5. Молниеотвод-шина (однослойная) для ветролопастей

Fig.5. Lightning rod booth (single layered) for wind turbine blades

Использование вязано-паяной сетки в шине-молниеотводе может создавать эффект индуктивности, который снижает критическое нарастание больших импульсных то-

ков молнии, что имеет важное значение для защиты шины от нагрева и разрушения [20]. Индуктивность в сетке шины-молниеотводе противодействует резкому изменению силы тока, вызванному импульсом молнии. Она замедляет нарастание тока, увеличивая длительность его протекания и снижая пиковое значение тока. Это снижает нагрузку на шину, помогает предотвратить перегрев и разрушение шины при больших импульсных токах.

Благодаря такому эффекту, поперечное сечение шины-молниеотвода может быть уменьшено без потери эффективности защиты. Оно приводит к уменьшению затрат на расход материала шины и упрощению конструкции молниеотвода.

Расчёт электропрочности композита. Обычная сетка, расположенная на углепластике без лакокрасочного покрытия, выдерживает воздействие нормированными импульсами. Наличие типовых лако-красочных покрытий и использование под сеткой монослоя стеклопластика ухудшают молниестойкость ПКМ. Для повышения эффективности защиты можно использовать несколько слоев под сеткой, что позволит увеличить электропрочность диэлектрика.

В случае отсутствия повреждений ток в углепластике благодаря высокой анизотропии материала преимущественно протекает по верхнему слою, который контактирует с каналом молнии [19]. При использовании защитного сеточного слоя ток в тонком несущем слое углепластика уменьшается:

$$I_y = I_m \cdot \rho_{пз} / (\rho_{пз} + \rho_{пг}),$$

где $\rho_{пг}$ и $\rho_{пз}$ — поверхностные удельные сопротивления одного тонкого несущего слоя углепластика и защитного слоя сетки соответственно. Удельное поверхностное сопротивление выражается через объемное в виде $\rho_{пг} = \rho_y / \Delta$, где Δ — толщина тонкого несущего слоя композита.

При средней толщине $\Delta = 10^{-2}$ см, $\rho_{пг} = \rho_y / \Delta = 0,2$ Ом. Отсюда удельное поверхностное сопротивление защитного слоя должно быть $\rho_{пз} < 0,2$ Ом.

Для достижения нормального функционирования защиты поверхностное сопротивление защитного слоя должно быть не более 0,2 Ом. Существенное снижение тока в защищаемом изделии и энергосодержание происходит при равенстве $\rho_{пз} = \rho_{пг} = 0,2$ Ом. В этом случае ток в защищаемом изделии снижается в 2 раза, а интеграл действия (энергосодержание) — в 4 раза.

Проведем оценку оптимального отношения величины $\rho_{пз} / \rho_{пг}$. При $\rho_{пз} = 0,1 \cdot \rho_{пг}$ отношение $I_y / I_m = 0,1$. Так как большая часть тока течет по верхнему слою углепластика, удельное энергосодержание в нем равно:

$$W_y = \rho_y A / (2\pi r_{кан} \Delta)^2,$$

где A — интеграл действия протекающего тока с радиусом канала разряда $r_{кан}$.

Чтобы углепластик не разрушался, удельное энергосодержание должно быть ниже критической величины $W_{кр2} = 2000$ Дж/см³, то есть должно выполняться соотношение:

$$\int I_m^2 dt < W_{кр2} (2\pi r_{кан} \Delta)^2 / \rho_y \quad (1)$$

Для значений $\rho_y = 2 \cdot 10^{-3}$ Ом·см, $r_{кан} = 1$ см и $\Delta = 10^{-2}$ см это условие может быть выполнено при допустимом интеграле действия $A = 4 \cdot 10^3$ А²·с.

При наличии защитного покрытия ток в углепластике снижается и условие (1) приобретает вид:

$$\int I_m^2 dt < W_{кр2} (2\pi r_{кан} \Delta)^2 / \rho_y [(\rho_{пг} + \rho_{пз}) / \rho_{пз}]^2$$

Реальные токи молнии имеют интеграл действия больше величины $4 \cdot 10^3$ А²·с, следо-

вательно молниезащита должна снижать ток в углепластике, по крайней мере, на порядок. При $\rho_{пз} = 0,01 \cdot \rho_{пу} = 0,02$ Ом это условие выполняется и энерговыделение уменьшается в 100 раз.

В упомянутой работе [19] была найдена связь между параметрами сетки и величинами, определяющими ее разрушения в виде эквивалентного сечения сетки

$$S_s = \frac{1}{2\pi r_{кан}} \sqrt{\frac{\rho_n A}{(T_{дон} \cdot C \cdot \gamma)}},$$

где $r_{кан}$ — радиус канала разряда молнии, A — интеграл действия, $T_{дон}$ — допустимая температура для медного провода; C, γ — теплоемкость и удельный вес материала.

Для создания надежной молниезащиты следует подобрать рациональные параметры сетки. Так, для практических целей в ветролопастях рекомендуется использовать сетку, изготовленную из двух луженых проволок диаметром 0,08 мм с применением пропайки сетчатого полотна. Из этой сетки можно изготовить как молниеуловитель, так и шину-молниеотвод. Последнюю можно уложить, например, в виде непропаянных между собой двух-четырёх слоёв с укладкой её в диэлектрические каналы тела лопасти по всей длине лопасти.

Проведенные выше оценки позволяют подобрать необходимый проводящий материал для защиты от молнии ветролопастей.

Результаты стендовых испытаний. Испытания разрядных панелей из стеклопластика с сетчатыми молниеприёмником и молниеотводом показали хорошую молниестойкость [20]. В образцах панелей пробой отсутствовал, но были повреждения наружного слоя покрытия глубиной до 0,5 мм и площадью примерно 90 см² (при нерациональной геометрии молниезащитной сетки).

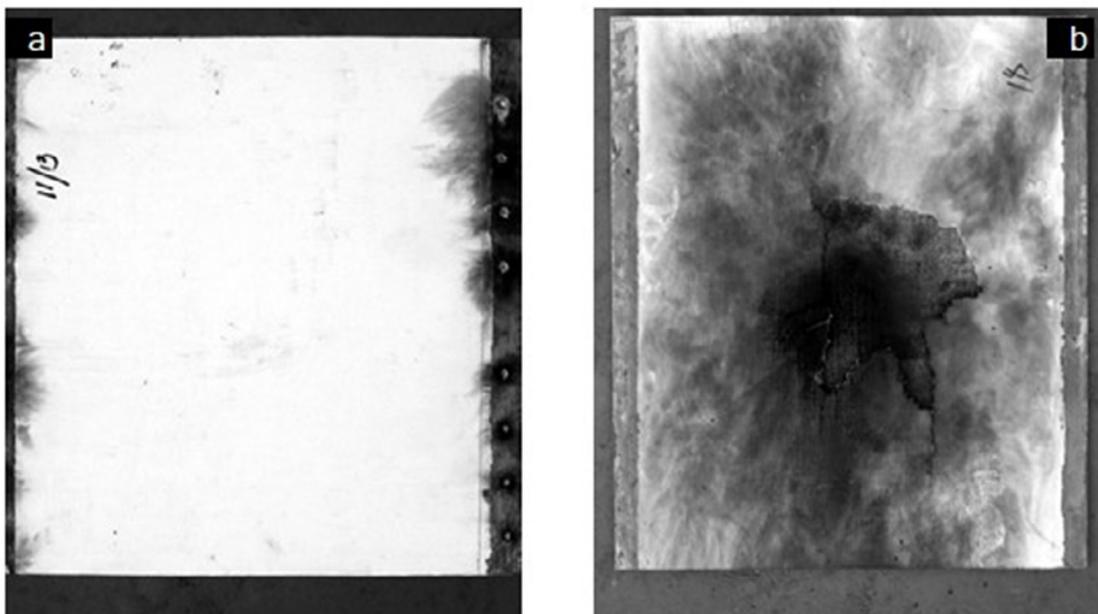


Рис.6. Образцы разрядных панелей из композита (стеклопластика) с сетчатыми молниеотводами после разрядных испытаний: а — панель, где пробой и повреждение отсутствуют, б — панель, где пробой отсутствует, но произошло повреждение наружного покрытия композита глубиной 0,5 мм и площадью 90 см².

Fig.6. Samples of discharge panels made of glassy carbon polymer composite and mesh lightning rods after discharge tests: а — a panel with no damage or break through; б — a panel that shows no break through but its outer composite coating was damaged to the depth of 0.5 mm and the area of 90 cm².

Разрядным испытаниям подвергали и углепластиковые панели подобной структуры [21]. Результаты испытаний таких панелей с защитой однониточными вязанопаяными сетками по условиям зоны 1А (для авиации) приведены на рис.6.

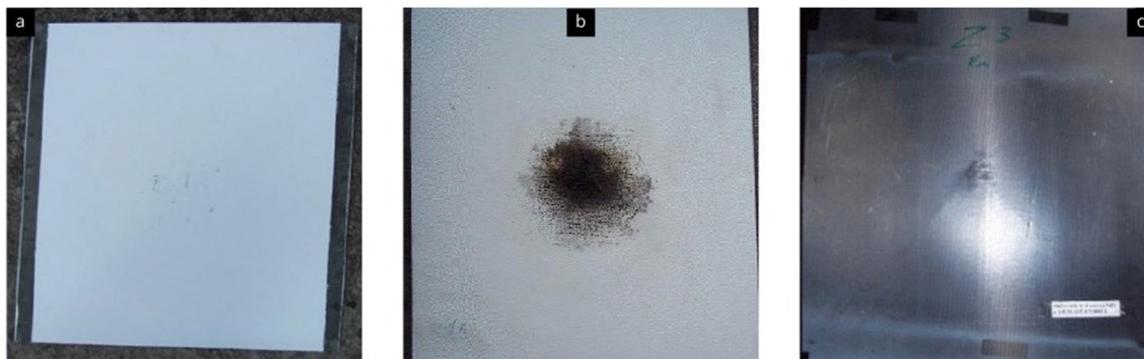


Рис. 7. Панель с вязано-паяной молниезащитной сеткой: а — до разрядных испытаний, б и с — после разрядных испытаний на сертифицированном разрядном стенде; б-лицевая сторона панели, с — тыльная сторона панели.

Fig. 7. A panel with knitted-soldered lightning strike protection mesh: a – before discharge tests, b and c — after discharge tests performed on a certified discharge stand; b – front side of the panel, c – rear side of the panel.

Практически полная сохранность разрядных панелей из углепластика в условиях высокой импульсной нагрузки создаёт перспективу применения для надёжной молниезащиты проволочными вязано-паяными сетками комбинированных конструкций ветролопастей из стекло – и углепластиков.

Выводы

Для системы молниезащиты ветролопастей предложены усовершенствованные конструкции молниеприемника и шины-молниеотвода с использованием проволочных медных вязано-паянных сеток. Это позволяет реализовать по сравнению с существующими системами молниезащиты такие преимущества: высокую эластичность и адгезию сеток к связующему, возможность наформовки сетки на требуемую большую площадь поверхности ветролопастей, управление параметрами сетки (количество проволок в пучке, количество слоев) для повышения молниестойкости конструкции при снижении материалоёмкости.

В испытательных высоких импульсных режимах воздействия молнии на молниеприемник лопасти происходит диссипация энергии за счет расплавления и испарения припоя, распайки и рассоединения петель сетки, что улучшает молниестойкость лопасти.

Вязано-паянная сетка в шине-молниеотводе реализует эффект индуктивности, который снижает критическое нарастание больших импульсных токов молнии и обеспечивает защиту шины от нагрева и разрушения. Благодаря такому эффекту, поперечное сечение шины-молниеотвода может быть уменьшено без потери эффективности защиты. Это может привести к уменьшению материалоёмкости и упрощению конструкции молниеотвода.

Результаты проведенных испытаний позволяют надеяться на широкое использование сетчатых молниеприемников и молниеотводов-шин из проволочных вязано-паянных сеток для молниезащиты современных лопастей ветроэлектродгенераторов.

Библиографический список

1. Pathania D, Singh D. A review on electrical properties of fiber reinforced polymer composites. *Int. J. Theor. Appl. Sci.* 2009; 1:34
2. Revel I, Evans S, Flourens F. Edge glow: A combined voltage/power controlled mechanism 33rd IntConf Light Prot ICLP 2016.
3. Kawakami H. Lightning Strike Induced Damage Mechanisms of Carbon Fiber Composites. University of Washington, 2011.
4. Black S. Lightning strike protection strategies for composite aircraft, <https://www.compositesworld.com/Articles/Lightning-Strike-Protection-Strategies-for-Composite-Aircraft>, 2013.
5. Morgan D, Hardwick CJ, Haigh SJ, Meakins A. J. The Interaction of Lightning with Aircraft and the Challenges of Lightning Testing. *J. Aerosp. Lab* 2012:1–10.
6. Richard E. Orville and Gary R. Huffines, Cloud-to-Ground Lightning in the United States: NLDN Results in the First Decade, 1989–98. 2001:1179

7. Dexmet Microgrid Products. Lightning Strike Protection for Carbon Fiber Aircraft SAMPE Conf., 2007.
8. Long M, Becerra M, Thottappillil R. On the Attachment of Dart Lightning Leaders to Wind Turbines. *Electr. Power Syst Res.* 2017.151:432–439.
9. Hanai M, Koyama H, Kubo N, Hashimoto Y, Suzuki I, Ueda Y, et al. Reproduction and Test Method of “FRP” Blade Failure for Wind Turbine Generators Caused by Lightning. *Int.Conf. Light Prot.* 2006:1509–14.
10. Naka T, Vasa N.J, Yokoyama S, Wada A, Asakawa A, Honda H, et al. Study on Lightning Protection Methods for Wind Turbine Blades. *IEEJ Trans. Power. Energy* 2005;125:993–9.
11. Arinaga S, Inoue K, Matsushita T. Experimental Study for Wind Turbine Blades Lightning Protection. *Renew ENERGY.* 2006:4–7.
12. Madsen S. F., «Interaction between electrical discharges and materials for wind turbine blades particularly related to lightning protection». *Electric Power Engineering.* The Technical University of Denmark, Ph.D. Thesis, March 2006, 184 p.
13. IEC 61400–24 Edition 2.0 2019–07.
14. Design guide for glass fiber reinforced plastic wind turbine blades [Электронный ресурс] www.wxguardwind.com.
15. <https://www.lightningdiversion.com/diversionstrips.aspx>
16. Вишняков Л.Р., Вишнякова Е.Л., Гуцин И.А. О комбинированной защите углепластиков от прямых ударов молнии. *Композиты и наноструктуры.* 2022. Т. 14. № 1 (53). С. 31–38.
17. Далидович А.С. Основы теории вязания. Издательство «Лёгкая индустрия», М.1970. 432с.
18. Вишняков Л.Р., Зубков О.В., Коханий В.А., Коханая И.Н. Вязано-паяные проволочные сетки для молниезащиты лопастей ветроэлектродгенераторов. *Технологические системы,* 2014. № 1 (58), С. 58–62.
19. Вишняков Л.Р., Гуцин И.А. Оценка снижения энергии разрушения молнией углепластика с защитой медной вязано-паяной сеткой. *Композиты и наноструктуры.* 2022. Т. 14. № 2 (54). С. 85–92.
20. Вишняков Л.Р., Зубков О.В., Коханий В.А., Коханая И.Н. Вязано-паяные проволочные сетки для молниезащиты композитных ветролопастей. *Композиты и наноструктуры.* 2019. Т. 11. № 3 (43). С. 100–104.
21. Вишняков Л.Р., Казаков М.Е., Бойцов Б.В., Кривонос В.В. Исследование влияния молниезащитных вязано-паяных сеток на стойкость к разрушению углепластиковых листов. *Композиты и наноструктуры.* 2020. Т. 14. № 1 (45). С. 1–7

References

1. Pathania D, Singh D. A review on electrical properties of fiber reinforced polymer composites. *Int. J. Theor. Appl.Sci.* 2009; 1:34
2. Revel I, Evans S, Flourens F. Edge glow: A combined voltage/power controlled mechanism 33rd IntConf Light Prot ICLP 2016.
3. Kawakami H. Lightning Strike Induced Damage Mechanisms of Carbon Fiber Composites. University of Washington, 2011.
4. Black S. Lightning strike protection strategies for composite aircraft, <https://www.compositesworld.com/Articles/Lightning-Strike-Protection-Strategies-for-Composite-Aircraft>, 2013.
5. Morgan D, Hardwick CJ, Haigh SJ, Meakins A. J. The Interaction of Lightning with Aircraft and the Challenges of Lightning Testing. *J. Aerosp. Lab.* 2012:1–10.
6. Richard E. Orville and Gary R. Huffines, Cloud-to-Ground Lightning in the United States: NLDN Results in the First Decade, 1989–98. 2001:1179
7. Dexmet Microgrid Products. Lightning Strike Protection for Carbon Fiber Aircraft SAMPE Conf., 2007.
8. Long M, Becerra M, Thottappillil R. On the Attachment of Dart Lightning Leaders to Wind Turbines. *Electr. Power Syst Res.* 2017.151:432–439.
9. Hanai M, Koyama H, Kubo N, Hashimoto Y, Suzuki I, Ueda Y, et al. Reproduction and Test Method of “FRP” Blade Failure for Wind Turbine Generators Caused by Lightning. *Int.Conf. Light Prot.* 2006:1509–14.
10. Naka T, Vasa N.J, Yokoyama S, Wada A, Asakawa A, Honda H, et al. Study on Lightning Protection Methods for Wind Turbine Blades. *IEEJ Trans. Power. Energy* 2005;125:993–9.
11. Arinaga S, Inoue K, Matsushita T. Experimental Study for Wind Turbine Blades Lightning Protection. *Renew ENERGY.* 2006:4–7.
12. Madsen S. F., «Interaction between electrical discharges and materials for wind turbine blades particularly related to lightning protection». *Electric Power Engineering.* The Technical University of Denmark, Ph.D. Thesis, March 2006, 184 p.
13. IEC 61400–24 Edition 2.0 2019–07.
14. Design guide for glass fiber reinforced plastic wind turbine blades www.wxguardwind.com.
15. <https://www.lightningdiversion.com/diversionstrips.aspx>
16. Vishnyakov L.R., Vishnyakova Ye.L., Gushchin I.A., About the combined protection of carbon fiber reinforced plastics from direct lightning strikes. *Kompozity i nanostruktury — Composites and nanostructures,* 2022. V. 14. No. 1 (53). pp. 31–38 (in Russian).
17. Dalidovich A.S. *Osnovy teorii vyazaniya. [Basics of knitting theory].* Moscow, Publishing house “«Logkaya

- индустрија» ", 1970. 432p. (in Russian).
18. Vishnyakov L.R., Zubkov O.V., Kokhany V.A., Kokhanaya I.N. Knitted-soldered wire mesh for lightning protection of wind power generator blades. Tekhnolo-gicheskiye sistemy — Technological systems, 2014. No. 1 (58), pp. 58–62 (in Russian).
 19. Vishnyakov L.R., Gushchin I.A. Assessment of the reduction in the energy of destruction by lightning of carbon fiber reinforced plastic with protection by a copper knitted-soldered mesh. Kompozity i nanostruktury — Composites and nanostructures, 2022. V. 14. No. 2 (54). pp. 85–92 (in Russian).
 20. Vishnyakov L.R., Zubkov O.V., Kokhany V.A., Kokhanaya I.N. Knitted-soldered wire mesh for lightning protection of composite wind blades. Kompozity i nanostruktury — Composites and nanostructures, 2019. V. 11. No. 3 (43). pp. 100–104 (in Russian).
 21. Vishnyakov L.R., L.R., Kazakov M.E., Boytsov B.V., Krivonos V.V. Study of the influence of lightning protection knitted-soldered meshes on the resistance to destruction of carbon fiber sheets. Kompozity i nanostruktury — Composites and nanostructures, 2020. V. 14. No. 1 (45). pp. 1–7 (in Russian).

Сведения об авторах

Вишняков Леон Романович – д.т.н, проф., главный специалист ООО «НПЦ «Увиком» Мытищи, Московская обл., Россия, e-mail: leon33leon@yandex.ru;

Гущин Игорь Ардальенович – к.т.н, доцент кафедры безопасности жизнедеятельности и инженерной экологии, Чувашский государственный университет, Россия, г. Чебоксары, e-mail: elpardo@list.ru;

Щаулов Владимир Валерьевич – соучредитель, Генеральный директор ООО «НПО Б ЭНД Б ИНДАСТРИЗ», Россия, e-mail: vlvsh@bandbind.ru;

Юсупов Кимал Наилевич – соучредитель, Директор по развитию ООО «НПО Б ЭНД Б ИНДАСТРИЗ», Россия, e-mail: vlvsh@bandbind.ru.