

УДК 629.735.33.551

DOI: 10.26467/2079-0619-2021-24-1-32-41

ПОВРЕЖДЕНИЕ КОНСТРУКЦИИ САМОЛЕТА МОЛНИЕЙ ПРИ НАЛИЧИИ ОСАДКОВ НА ЕГО ПОВЕРХНОСТИ

С.К. КАМЗОЛОВ¹, С.М. НОВИКОВ¹, А.Н. РАЗУМОВСКИЙ¹

¹Московский государственный технический университет гражданской авиации,
г. Москва, Россия

При поражении самолета молнией повреждение наружных элементов конструкции вызывается в первую очередь электромеханическим воздействием разряда на воздушное судно (ВС), следствием которого является образование вмятин на обшивке, загибов консольных элементов (известны случаи загиба лопастей винтов ТВД) и подобных деформаций. Механизм такого воздействия молнии обусловлен, во-первых, действием пондеромоторных сил, рождаемых взаимодействием тока в канале молниевых разряда с токами, растекающимися по металлическим конструкциям ВС. Во-вторых, механическое воздействие на элементы конструкции оказывает ударная волна от молнии. Наличие на поверхности воздушного судна конденсата (влаги, льда) может существенно усилить повреждение обшивки в результате электромеханического воздействия молнии, что подтвердили результаты экспериментальных исследований, проведенных на кафедре физики МГТУ ГА. Толщина слоя воды (как известно, гроза в подавляющем большинстве случаев сопровождается осадками) может быть достаточно большой, особенно на земле во время стоянки и руления, а также при взлете и во время посадки. При параметрах испытательного электрического разряда (амплитуда тока 50–60 кА, длительность первой полувольты 30 мкс), близких к средним параметрам натуральной молнии, поражающей воздушные суда, испытывались листовые образцы обшивки из алюминиевого сплава Д16АТ. При варьировании толщины слоя воды до 8 мм на образцах толщиной 1,5 мм образовывались вмятины глубиной до 2 мм и диаметром до 30 мм, при толщине образца 0,8 мм – глубиной свыше 10 мм и диаметром до 60–70 мм. Расчетные оценки показали, что наличие воды в несколько раз увеличивает электродинамическое давление на обшивку. С учетом упругой составляющей такая деформация при ударе молнии может, во-первых, представлять опасность для устройств и коммуникаций, расположенных непосредственно под обшивкой. Также усиление электромеханического давления в купе с ударной акустической волной, рождаемой молнией, может привести к сверхкритическим нагрузкам в элементах крепления обшивки. Все это должно быть учтено как на стадии проектирования воздушного судна, так и в процессе эксплуатации, в частности при послеполетном осмотре ВС, пораженного молнией.

Ключевые слова: самолет, молния, осадки, обшивка, пондеромоторные силы, деформация.

ВВЕДЕНИЕ

Поражение самолета молнией в подавляющем большинстве случаев происходит при наличии осадков на его поверхности: это либо вода от дождя в зоне осадков, либо конденсат в облаках, в том числе обледенение. Толщина слоя воды может быть достаточно большой, особенно на земле во время стоянки и руления (рис. 1), а также при взлете и во время посадки. В данной работе будет экспериментально показано, как наличие воды на поверхности металлической обшивки самолета может усилить ее повреждение при поражении молнией.

Электромеханическое воздействие молнии на воздушное судно (ВС), следствием которого является образование вмятин на обшивке, загибов консольных элементов (известны случаи загиба лопастей винтов ТВД) и подобных деформаций, обусловлено, во-первых, действием пондеромоторных сил, рождаемых взаимодействием тока в канале молниевых разряда с токами, растекающимися по металлическим конструкциям ВС [1]. Основную роль в механизме повреждения играет при этом импульсная компонента, и степень повреждения определяется амплитудой тока молнии I_0 . Существует критерий стойкости элементов конструкции к образованию деформаций [2]:

$$Ka = \frac{I_0}{L} \sqrt{\frac{\mu_0}{[\sigma]}}$$

где L – характерный размер элемента конструкции, μ_0 – магнитная постоянная, $[\sigma]$ – предельно допустимое напряжение. Расчетное критическое значение критерия, которое согласуется с экспериментом, для листовых элементов конструкции составляет значение $Ka_{кр} \approx 3,3$ [2].



Рис. 1. Поражение самолета молнией при рулении
Fig. 1. Lightning strike of the aircraft during taxiing

(<https://nypost.com/2015/08/20/watch-the-moment-a-lightning-bolt-strikes-an-airplane/amp/>)

Во-вторых, механическое воздействие на элементы конструкции оказывает ударная волна от молнии. Известны данные [3], согласно которым на расстояниях до 1 м перепад давления на фронте волны может достигать нескольких сот атмосфер. Поэтому на таких расстояниях при ориентации канала разряда параллельно обшивке в последней могут развиваться сверхкритические напряжения. Однако для металлической обшивки такой случай представляется в значительной степени гипотетическим, поскольку эффект может достигаться лишь на малых расстояниях, а в этом случае высока вероятность «перехвата» молнии металлической поверхностью. В случае же нормальной ориентации канала молнии к поверхности обшивки, как показывают расчеты [1], при амплитуде тока 100 кА и длительности разряда 50 мкс максимальные напряжения в обшивке могут достигать 100 МПа, что соизмеримо со штатными нагрузками в спокойном режиме полета.

Использование композиционных материалов, все шире применяемых в авиастроении, для наружных элементов конструкции ВС во многом осложняет проблему молниестойкости авиационных конструкций. Установлено, что импульсная составляющая тока молнии вызывает более существенные, по сравнению с металлическими, разрушения изделий, как из диэлектрических, так и из частично проводящих композитов [4]. Причем диэлектрики заметно разрушаются в условиях пробоя даже при минимальных токах (единицы килоампер). При сотнях килоампер («жесткие» молнии) размеры зоны разрушений достигают десятков сантиметров вследствие взрывного эффекта при развитии разряда внутри композита. Взрывной характер разрушения и еще более тяжелое повреждение наблюдались при наличии проводящих компонентов внутри композита [5]. И в том, и в другом случае истинные масштабы разрушения существенно превышают визуально наблюдаемые. Для защиты конструкций из композитов используют, во-первых, металлические, полупроводящие и газоразрядные молниеприемники, создающие безопасные пути протекания тока вдоль поверхности на металлический корпус, а во-вторых – сплошные проводящие и полупроводящие покрытия [4, 5].

Наличие на поверхности воздушного судна конденсата (влаги, льда) может существенно усилить повреждение обшивки (как металлической, так и композитной с проводящим покрытием) в результате электромеханического воздействия молнии. Ранее было показано, что в условиях обледенения такое усиление может быть весьма значительным [1]. В данной работе будет экспериментально доказано, что этому же, хотя и в меньшей степени, способствует влага на поверхности, в первую очередь в результате дождя (как известно, гроза в подавляющем большинстве случаев сопровождается осадками).

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ РЕЗУЛЬТАТЫ

Соответствующие испытания проводились на экспериментальной базе кафедры физики МГТУ ГА. Параметры испытательного сильноточного импульсного электрического разряда: амплитуда тока $50 \div 60$ кА, длительность первой полуволны 30 мкс, что близко к средним параметрам натуральной молнии, поражающей воздушные суда [6, 7]. На рис. 2 представлена экспериментальная зависимость глубины вмятины h_e от толщины слоя воды δ на поверхности образца. Испытывались листовые образцы из алюминиевого сплава Д16АТ шириной 100 мм, толщиной 0,8 и 1,5 мм.

Экспериментальная установка, использующая накопитель заряда емкостью 150 мкФ при напряжении 10 кВ, обеспечила колебательный затухающий разрядный импульс с амплитудой тока до 80 кА, периодом до 120 мкс, общей длительностью разряда 240 мкс, декрементом затухания 5,8, величиной протекшего заряда 6 Кл при длине разрядного промежутка до 70 мм. Образец исследуемого материала являлся одним из электродов. Заряд инициировался взрывающейся проволокой, которая крепилась на высоковольтном электроде, материал проволоки – медь, диаметр – $0,1 \div 0,15$ мм. Для снижения влияния проволоки на величину эрозии образца между проволокой и образцом устанавливался зазор $3 \div 5$ мм. Специальные эксперименты показали, что такой зазор практически исключает подобное влияние. Для пробоя этого зазора запуск разрядника осуществлялся импульсом высокого напряжения ($30 \div 35$ кВ). Для исключения «электрического ветра», приводящего к отклонению столь тонкой проволоки от оси разрядной камеры в момент подачи напряжения, разрядный промежуток шунтировался высокоомным сопротивлением.

Разрядная камера выполнена по коаксиальному типу, что исключило возмущающее влияние на канал разряда магнитных полей обратных токопроводов. Такая конструкция камеры потребовала специальной научной проработки и защищена авторским свидетельством. Подвод напряжения к камере также осуществлялся коаксиальным кабелем. Эффективность таких мер подтвердили фотосъемки скоростным фоторегистратором СФР-2М, показавшие устойчивое горение разряда и отсутствие его направленного горизонтального смещения.

Длина разрядного промежутка между высоковольтным электродом и образцом выбиралась из условия исключения воздействия на образец посторонних, не свойственных молнии, факторов. Была экспериментально определена длина стабилизации, т. е. такая величина разрядного промежутка, начиная с которой параметры эрозии и деформации образца перестают зависеть от него. При вариации длины разрядного промежутка от 2 до 200 мм было установлено, что коаксиальная конструкция разрядной камеры при указанных выше параметрах импульса обеспечивает минимальную длину стабилизации 50 мм. Результаты согласуются с данными других авторов [8].

Измерение параметров разрядного импульса проводилось с помощью коаксиального шунта с запоминающим осциллографом, а также киловольтметра.

Характерным результатом воздействия сильноточного электрического разряда на листовый материал, покрытый слоем жидкости, в данном случае водой, является образование вмятины в зоне воздействия разряда. Из рис. 2 видно, что глубина вмятины существенно зависит как

от толщины слоя воды, так и от толщины образца обшивки. (Заметим при этом, что в отсутствие воды вмятины образовались лишь на тонких образцах толщиной 0,8 мм.) От этих же параметров зависит и средний диаметр D вмятины (рис. 3).

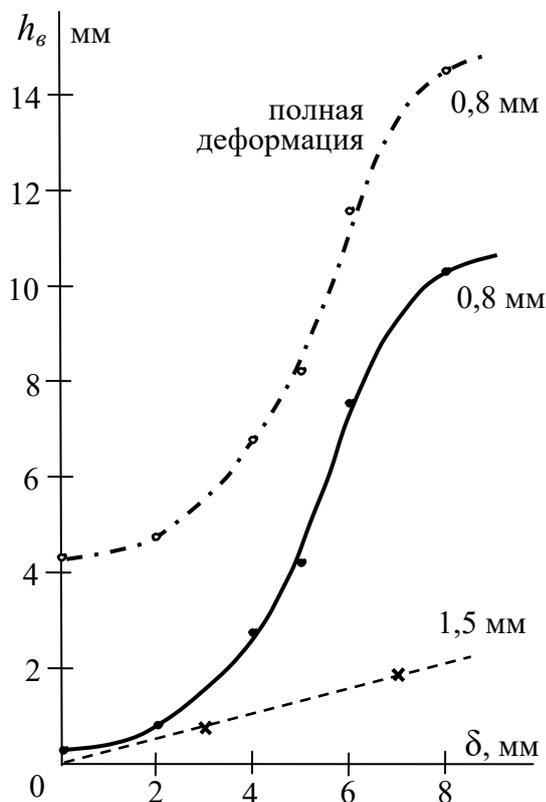


Рис. 2. Зависимость глубины вмятины h_δ от толщины слоя воды δ для разных толщин образца

Fig. 2. Graph of the indentation depth h_δ on the water depth δ for different sample thicknesses

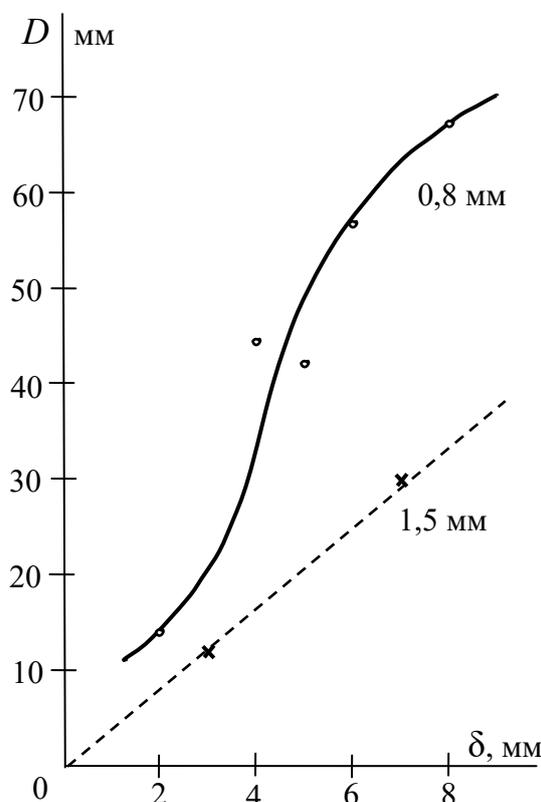


Рис. 3. Зависимость диаметра вмятины D от толщины слоя воды δ для разных толщин образца

Fig. 3. Graph of the indentation diameter D on the water depth δ for different sample thicknesses

В этих же условиях кроме остаточной деформации (глубины вмятины) определялась и упругая составляющая деформации. Способ ее измерения был весьма прост: непосредственно под точкой привязки разряда ниже образца на специальной подставке располагался пластилиновый столбик, который деформировался во время разрядного удара. После разряда измерялся зазор между образцом и деформированным столбиком. На рис. 2 вместе с кривыми остаточных деформаций нанесены и кривые полных, т. е. суммарных, деформаций. Измеренные таким образом значения упругой составляющей деформации во всем диапазоне толщин слоя воды оставались примерно одинаковыми и для образцов обшивки толщиной 0,8 мм составляли величину $3,5 \div 4,6$ мм (рис. 2), а для образцов толщиной 1,5 мм – порядка $2,5 \div 3$ мм.

Разберемся в механизме усиления деформации обшивки сильноточным электрическим разрядом при наличии на ее поверхности жидкости, в данном случае – воды. В первую очередь конденсат на поверхности электрода оказывает контрагирующее воздействие на разряд, который сжимается в его толще, вследствие чего усиливается пондеромоторное давление на проводящую пластинку (образец обшивки), а также пинчевое давление внутри канала разряда.

В работе [2] получена зависимость такого суммарного давления p_0 в центре пятна привязки разряда от радиуса d_p этого пятна:

$$p_0 = \frac{\mu_0 I^2}{\pi d_p^2},$$

где I – сила тока в разрядном импульсе. На рис. 4 показана полученная в описанных выше экспериментах зависимость диаметра разрядного пятна от толщины слоя воды при указанных выше параметрах импульсного разряда, из которой следует, что диаметр пятна уменьшается почти на треть при наличии слоя воды толщиной 8 мм по сравнению с сухими образцами. (Заметим, что толщина образца обшивки не влияет на диаметр разрядного пятна, и это вполне естественно.)

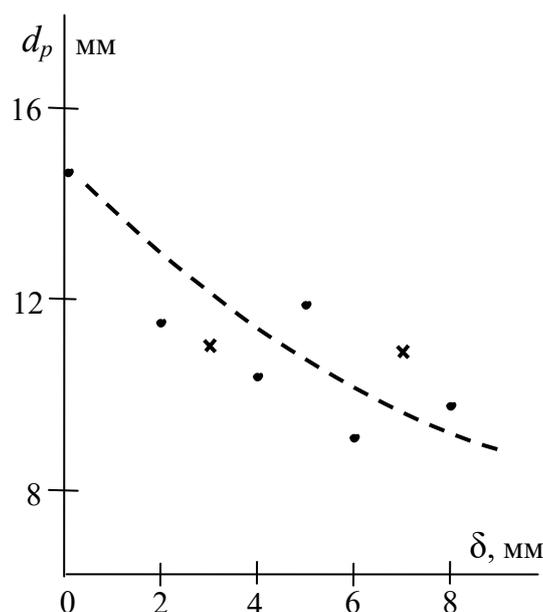


Рис. 4. Зависимость диаметра пятна привязки разряда d_p от толщины слоя воды δ
Fig. 4. Graph of the discharge affixment spot diameter d_p on the water depth δ

Оценка давления по представленному расчетному соотношению дает усиление амплитудного давления в центре пятна привязки разряда соответственно с 12 до 30 МПа.

Подобные процессы описаны исследователями электрогидравлического эффекта. Показано, что в случае, когда канал разряда полностью проходит в воде, при схожих его параметрах (амплитуда импульса тока 50 кА, длительность 40 мкс) давление может достигать 300 МПа (трех тысяч атмосфер) [9–11].

РАСЧЕТ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ ПРИ НАЛИЧИИ ВЛАГИ

Для расчета дополнительного давления авторы обобщили и использовали результаты известных исследований взрывных процессов при мощных электрических разрядах в жидкостях, в первую очередь в воде. Механизм усиления электромеханического воздействия при наличии жидкости следующий. Импульсный сильноточный разряд в конденсированной среде вызывает взрывной процесс, сопровождающийся крайне быстрым выделением энергии и связанным с этим внезапным изменением состояния окружающей среды, образованием ударной волны, т. е. переходом начальной энергии в энергию движения вещества. Как известно, явления, сопровождающие расширение канала электрического разряда в жидкости (электрогидравлический эффект) столь эффективны, что имеют различное технологическое применение [11].

Образование ударной волны представляет собой следующую последовательность явлений и процессов [10]: формирование канала сквозной проводимости, трансформация электрической энергии накопителя во внутреннюю энергию продуктов канала разряда, расширение канала с последующим его вырождением в газовую полость, претерпевающую несколько затухающих пульсаций, формирование в жидкости переменного во времени и пространстве поля давлений и массовых скоростей, взаимодействия этого поля с объектом воздействия (в нашем случае – с обшивкой воздушного судна), в результате – создание в нем напряженного состояния либо с пластическим течением, либо с ростом трещин и разрушением. Приведенная последовательность является упрощенной и не учитывает ряд побочных явлений, таких как передача тепла от ионизированного канала за счет различных механизмов теплопроводности, приэлектродные процессы и др.

При электрическом пробое конденсированных диэлектриков характерны следующие закономерности [9]: развитие ионизации диэлектрика предшествует фазовым превращениям вещества, разряд развивается со скоростью, достигающей 10^5 м/с; с ростом температуры, вплоть до температуры фазового превращения, растет проводимость диэлектрика. Для чистой воды (электропроводность 10^{-3} – 10^{-4} Ом $^{-1}$ м $^{-1}$) предельная максимальная экспозиция напряжения, при котором реализуется лидерный пробой жидкостей, составляет 10–100 мкс, что перекрывает характерные времена импульсной составляющей тока молнии [12]. Следовательно, в случае молнии более типичен искровой пробой, который характеризуется относительно малыми энергетическими затратами и не вносит существенных возмущений плотности в окружающую среду на стадии предпробивного процесса. Последнее очень важно при формировании волны давления: демпфирующее влияние на нее со стороны этих возмущений невелико.

По завершении инициирования разряда в диэлектрике возникает канал сквозной проводимости, т. е. полость, заполненная ионизированным газом. Начальная форма и размеры канала определяются способом инициирования. При электрическом пробое в жидкостях диаметр канала $\sim 10^{-4}$ м, при электрическом взрыве проводника начальный диаметр канала равен диаметру проволоочки [10]. Это обстоятельство обусловило выбор диаметра проволоочки в описываемых нами экспериментах – $0,1 \div 0,15$ мм. Благодаря интенсивному разогреву плазмы разрядным током вследствие джоулева тепловыделения происходит настолько быстрое расширение канала, что смещение его границ за счет испарения жидкости несущественно.

Обратимся к закономерностям энерговыделения в разрядном канале. Как следует из вышесказанного, электрическая энергия в разряде преобразуется в основном в работу расширения. Оценим возникающее при этом давление на жидкие границы в канале разряда. Активное сопротивление канала при разряде в воде определяют эмпирической формулой [9]

$$R = \frac{Al}{\sqrt{\int_0^t I^2 dt}}, \quad (1)$$

где l – длина разряда в жидкости, I – сила тока в разряде в зависимости от времени t , а квадрат эмпирического коэффициента для воды составляет величину $A^2 \approx (0,22 \div 0,28) \cdot 10^5$ В 2 с \cdot м $^{-2}$ [9]. Используя формулу (1), получаем выражение для закона энерговыделения в той части канала разряда (т. е. молнии), которая находится в жидкости:

$$W(t) = \int_0^t I^2 R dt = 2Al \sqrt{\int_0^t I^2 dt}. \quad (2)$$

Если учесть, что в эксперименте, как было указано выше, использовался разрядный импульс в виде гармонической полуволны

$$I = I_0 \sin \frac{\pi}{\tau} t,$$

где I_0 – амплитуда тока в импульсе, τ – продолжительность импульса, то уравнение (2) примет вид

$$W = \frac{2}{\sqrt{2}} AI_0 \tau^{1/2}. \quad (3)$$

В этом случае в слое воды толщиной, например, 5 мм при амплитуде тока 65 кА и длительности импульса 50 мкс выделяется энергия ~ 500 Дж. (Для наглядности: если грубо предположить, что эта энергия распределяется по всем направлениям одинаково, то эффект воздействия канала разряда на обшивку при таком энерговыделении сопоставим с ударом трехкилограммового ядра, упавшего с высоты 3 м.)

Используем вычисленные значения тепловыделения для оценки возникающего при этом давления в зоне привязки разряда к металлической поверхности. Такие оценки важны для расчета возможных деформаций обшивки воздушных судов при воздействии разрядов атмосферного электричества.

Известна простая связь давления p и объемной плотности энергии w для идеального газа:

$$p = w(\gamma - 1), \quad (4)$$

где γ – показатель адиабаты. В случае ионизированного газа $\gamma = f(w, p)$, однако в интересующем нас диапазоне давлений и температур изменение этой величины относительно невелико, что позволяет выбрать некоторую эффективную постоянную: для плазмы разряда в воде она составляет $\gamma \approx 1,26$ [10].

Используя соотношения (3) и (4), можно получить значение давления для полусинусоиды:

$$p = \frac{2\sqrt{2} AI_0 \tau^{1/2}}{\pi r_k^2} (\gamma - 1), \quad (5)$$

где r_k – радиус канала разряда. В определении этого параметра – наибольшая сложность, поскольку он зависит от всех остальных величин, входящих в уравнение (5). Если для грубой оценки принять, что радиус канала разряда в воде меньше радиуса канала в воздухе в той же пропорции, как и для зоны привязки разряда (см. рис. 4), то в момент достижения током в импульсе своего амплитудного значения можно считать $r_k \sim 10$ мм. Тогда давление при толщине слоя воды, например, 5 мм составит величину $p \sim 160$ МПа (1600 атм). Полученные оценки согласуются с данными, приведенными в работах [9–11].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, экспериментальные исследования и расчетные оценки указывают на существенное усиление электромеханического воздействия сильноточного электрического разряда на металлическую тонкую пластинку при наличии на ней слоя жидкости. При параметрах разряда, идентичных параметрам, характерным для импульсной компоненты тока молний, поражающих воздушные суда, наличие воды на проводящей обшивке в несколько раз увеличивает

электродинамическое давление на обшивку. Это может приводить, во-первых, к образованию остаточных деформаций в зонах привязки разряда, например в виде вмятин. С учетом упругой составляющей такие деформации при ударе молнии могут представлять опасность для устройств и коммуникаций, расположенных непосредственно под обшивкой. Во-вторых, усиление электромеханического давления вкупе с ударной акустической волной, рождаемой молнией, может привести к сверхкритическим нагрузкам в элементах крепления обшивки. Все это должно быть учтено как на стадии проектирования воздушного судна, так и в процессе его эксплуатации, в частности при послеполетном осмотре ВС, пораженного молнией.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Kamzolov S.K.** Lightning treat for modern airplanes / S.K. Kamzolov, I.G. Kirpichev, A.A. Komov, E.A. Konyaev, A.A. Kuleshov // International Journal of Mechanical Engineering and Technology. 2017. Vol. 8, iss. 11. Pp. 756–768.
2. **Камзолов С.К.** Критерий стойкости конструкций к электромеханическому воздействию сильноточных разрядов // Электричество. 1992. № 9. С. 24–26.
3. **Faulkner L.L., Shumacher G.P.** Prediction of aircraft structural damage from overpressures due to lightning strikes // SAE Technical Paper Series. 1983. Pp. 1–8.
4. **Борисов М.Б., Чистяков Ю.А.** Экспериментальные исследования молниестойкости конструкций воздушных судов из композиционных материалов // Сборник научных трудов № 231. М.: Московский энергетический институт, 1990. С. 89–94.
5. **Авруцкий В.А.** Исследование воздействия электрических разрядов на изделия с обшивкой из конструкционных композиционных диэлектрических материалов и средства их защиты от молнии / В.А. Авруцкий, А.С. Бизяев, В.П. Ларионов, Л.В. Левитова, Е.Н. Прохоров, И.М. Сергиевская, С.А. Чебанюк // Сборник научных трудов № 231. М.: Московский энергетический институт, 1990. С. 49–60.
6. **Clifford D.W.** Characteristics of lightning strikes to aircraft // Proceedings of the International Conference on Lightning and Static Electricity. Oxford, 25–30 March 1982. Pp. A9-1–A9-11.
7. **Fisher B.D.** Characteristics of lightning strikes experienced by the NASA F-1068 airplane / B.D. Fisher, V. Mazur, J.A. Plumer, J.C. Gerlach // AIAA Paper. 1984. No. 2234. Pp. 37–43.
8. **Буткевич Г.В.** Электрическая эрозия сильноточных контактов и электродов / Г.В. Буткевич, Г.С. Белкин, Н.А. Вешенков, М.А. Жаворонков. М.: Энергия, 1978. 253 с.
9. **Ушаков В.Я.** Импульсный диэлектрический пробой жидкостей. Томск: ТГУ, 1975. 256 с.
10. **Семкин Б.В.** Электрический взрыв в конденсированных средах: учеб. пособие. Томск: ТПИ, 1979. 89 с.
11. **Юткин Л.А.** Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности. Л.: Машиностроение, 1986. 253 с.
12. **Базелян Э.М., Райзер Ю.П.** Физика молнии и молниезащиты. М.: Физматлит, 2001. 320 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Камзолов Сергей Константинович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры физики МГТУ ГА, skkamzolov@mail.ru.

Новиков Сергей Михайлович, кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры физики МГТУ ГА, smnovikov@mail.ru.

Разумовский Анатолий Николаевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры физики МГТУ ГА, ran5577@yandex.ru.

DAMAGE OF THE AIRCRAFT STRUCTURAL SYSTEM BY LIGHTNING WITH RAIN PRECIPITATION ON ITS SURFACE

Sergey K. Kamzolov¹, Sergey M. Novikov¹, Anatoly N. Razumovsky¹
¹Moscow State Technical University of Civil Aviation,
Moscow, Russia

ABSTRACT

When an aircraft is struck by lightning damage of external structural elements is primarily caused by mechanical electrical impact of discharge on the aircraft, which results in the formation of dents on the skin, bends of panel elements (there have been cases of bending turbofan blades) and other deformations. Firstly, the mechanism of such lightning effect is caused by the action of ponderomotive forces generated by the interaction of the current in the lightning channel with currents flowing through the metal structures of the aircraft. Secondly, the shockwave of lightning has a physical impact on the elements of construction. The presence of condensation (moisture, ice) on the surface of the aircraft can significantly increase the damage of fuselage skin resulting from the electromechanical impact of lightning, which was confirmed by the results of the experimental research conducted at the Chair of Physics of the Moscow State Technical University of Civil Aviation. The water depth (as far as it is known, thunderstorm in most cases is accompanied by rain precipitation) can be large enough especially on the ground during parking and taxiing, as well as at takeoff operation and landing. Sheet samples of aluminum alloy skin D16AT with electrical discharge parameters (current amplitude 50–60 kA, duration of the first half-wave 30 microseconds) which were relatively equal to average parameters of natural lightning strike were tested. With water depth of not over 8 mm the indentations up to 2 mm deep and 30 mm in diameter were formed on samples up to 1,5 mm thick, with a sample thickness of 0,8 mm – over 10 mm in depth and up to 60–70 mm in diameter. Educated estimates indicated that presence of water increases the electrodynamic pressure on the skin several times. Firstly, having in consideration the elastic component such deformation can bring a danger to control mechanisms and surfaces located proximately under the skin when subjected to lightning strike. Secondly, electromechanical pressure amplification coupled with the striking acoustic wave generated by lightning can result in supercritical pressures in the mounting hardware of the skin. All of this should be taken into account both at the design stage of the aircraft and during aircraft operation including in particular post-flight inspection of the aircraft struck by lightning.

Key words: aircraft, lightning, precipitation, skin, the design stage of the aircraft.

REFERENCES

1. Kamzolov, S.K., Kirpichev, I.G., Komov, A.A., Konyaev, E.A. and Kuleshov, A.A. (2017). *Lightning treat for modern airplanes*. International Journal of Mechanical Engineering and Technology, vol. 8, issue 11, pp. 756–768.
2. Kamzolov, S.K. (1992). *Kriteriy stoykosti konstruksiy k elektromekhanicheskomu vozdeystviyu silnotochnykh razryadov* [Criteria of constructions durability to the electromechanical effects of high-current discharges]. *Elektrichestvo*, no. 9, pp. 24–26. (in Russian)
3. Faulkner, L.L. and Shumacher, G.P. (1983). *Prediction of aircraft structural damage from overpressures due to lightning strikes*. SAE Technical Paper Series, pp.1–8.
4. Borisov, M.B. and Chistyakov, Yu.A. (1990). *Eksperimentalnyye issledovaniya molniyestoykosti konstruksiy vozdukhnykh sudov iz kompozitsionnykh materialov* [Experimental studies of lightning resistance of aircraft's constructions made with composite materials]. *Sbornik nauchnykh trudov no. 231*. Moscow: Moskovskiy energiticheskiy institut, pp. 89–94. (in Russian)
5. Avrutskiy, V.A., Bizyaev, A.S., Larionov, V.I., Levitova, L.V., Prokhorov, E.N., Sergievskaya, I.M. and Chebanyuk, S.A. (1990). *Issledovaniye vozdeystviya elektricheskikh razryadov na izdeliya s obshivkoy iz konstruksionnykh kompozitsionnykh dielektricheskikh materialov i sredstv ikh zashity ot molnii* [The research of the electrical discharges impact onto products covered by skin made of constructional composite dielectric materials and the means of their protection from lightning]. *Sbornik nauchnykh trudov no. 231*. Moscow: Moskovskiy energiticheskiy institut, pp. 49–60. (in Russian)

6. **Clifford, D.W.** (1982). *Characteristics of lightning strikes to aircraft*. Proceedings of the International Conference on Lightning and Static Electricity, pp. A9-1–A9-11.
7. **Fisher, B.D., Mazur, V., Plumer, J.A. and Gerlach, J.C.** (1984). *Characteristics of lightning strikes experienced by the NASA F-1068 airplane*. AIAA Paper, no. 2234, pp. 37–43.
8. **Butkevich, G.V., Belkin, G.S., Veshenkov, N.A. and Zhavoronkov, M.A.** (1978). *Elektricheskaya eroziya silnotochnykh kontaktov i elektrodov* [Electrical erosion of high-current contacts and electrodes]. Moscow: Energiya, 253 p. (in Russian)
9. **Ushakov, V.Ya.** (1975). *Impulsnyy dielektricheskiy proboy zhidkostey* [Pulsed dielectric breakdown of liquids]. Tomsk: TGU, 256 p. (in Russian)
10. **Semkin, B.V.** (1979). *Elektricheskiy vzryv v kondensirovannykh sredakh* [Electrical explosion in condensed environment]. Tomsk: TPU, 89 p. (in Russian)
11. **Yutkin, L.A.** (1986). *Elektrogidravlicheskiy effekt i ego primeneniye v promyshlennosti* [Electrohydraulic effect and its application in industry]. Leningrad: Mashinostroyeniye, 253 p. (in Russian)
12. **Bazelyan, E.M. and Rizer, Ju.P.** (2001). *Fizika molnii i molniyezashchity* [Physics of lightning and lightning protection]. Moscow: Fizmatlit, 320 p. (in Russian)

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sergey K. Kamzolov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Chair of Physics, Moscow State Technical University of Civil Aviation, skkamzolov@mail.ru.

Sergey M. Novikov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Chair of Physics, Moscow State Technical University of Civil Aviation, smnovikov@mail.ru.

Anatoly N. Razumovsky, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Chair of Physics, Moscow State Technical University of Civil Aviation, ran5577@yandex.ru.

Поступила в редакцию 02.11.2020
Принята в печать 28.01.2021

Received 02.11.2020
Accepted for publication 28.01.2021