

03;04

Экспериментальное исследование пробоя диэлектрической оболочки носовых обтекателей самолетов на моделях с использованием искусственных заряженных аэрозольных облаков

© А.Г. Темников, Л.Л. Черненский, А.В. Орлов, С.С. Антоненко

Московский энергетический институт (Технический университет)
E-mail: TemnikovAG@mpei.ru

Поступило в Редакцию 15 марта 2011 г.

Представляются результаты экспериментального исследования пробоя диэлектрической оболочки носовых обтекателей самолетов на моделях с использованием искусственных заряженных аэрозольных облаков. Найдено, что в большинстве случаев электрический пробой оболочки модели обтекателя происходит без явного развития разряда между облаком заряженного водного аэрозоля и моделью антенны под обтекателем. Определены экспериментально вероятности пробоя оболочки для разных вариантов модели диэлектрического обтекателя. Предложен возможный механизм формирования пробоя оболочки полых диэлектрических обтекателей при их взаимодействии с облаками заряженного водного аэрозоля и электрическими разрядами из них, учитывающий процесс накопления зарядов разных знаков на внутренней и внешней поверхности обтекателя.

Носовые диэлектрические обтекатели самолетов предназначены для защиты антенных систем радиолокационных станций от воздействия окружающей среды в условиях полета. Их форма определяется конфигурацией антенных устройств и аэродинамическими характеристиками самолета. Оптимальной считается такая конструкция обтекателя, при которой наряду с хорошей аэродинамикой, достаточными механической прочностью, термостойкостью и стойкостью к воздействию климатических факторов он оказывает минимальное влияние на характеристики излучения антенны. Поэтому толщина диэлектрической оболочки носового обтекателя не превышает нескольких миллиметров.

При воздействии грозových облаков и/или попадании молнии в носовой обтекатель самолета может произойти его электрический пробой, что может привести к разрушению оболочки обтекателя. Разрушение диэлектрической оболочки обтекателя самолета встречными газодинамическими потоками воздуха после электрического пробоя ведет к существенному ухудшению аэродинамических свойств самолета [1,2]. Если носовой обтекатель после пробоя не разрушился, система радиолокации и навигации, находящаяся под обтекателем самолета, может выйти из строя полностью или частично при контакте канала разряда, сформировавшегося при пробое, с антенной. В результате может быть нарушена не только связь с наземными навигационными и управляющими системами, но и способность экипажа самолета контролировать обстановку на трассе полета. Несмотря на то что носовые радиопрозрачные обтекатели самолетов проходят высоковольтные испытания и оборудуются средствами молниезащиты, пока не удастся полностью исключить авиационные происшествия, связанные с пробоем диэлектрической оболочки носового обтекателя самолета [3,4].

Использование искусственных облаков сильно заряженного водного аэрозоля дает возможность выявить возможные ключевые механизмы воздействия грозы и молнии на носовой обтекатель самолета, приводящие к пробое его оболочки.

Экспериментальные исследования с использованием искусственных облаков заряженного водного аэрозоля показали, что одним из механизмов взаимодействия носовых радиопрозрачных обтекателей самолетов с грозowymi (электрически активными) облаками и молнией является процесс осаждения зарядов разных знаков на внутренней и внешней поверхности полового диэлектрического обтекателя [5].

На внешнюю поверхность могут осаждаться отрицательные заряды (ионы и заряженные аэрозольные частицы), приходящие из заряженного облака (для определенности считаем, что облако имеет отрицательную полярность). На внутреннюю поверхность обтекателя осаждаются положительные ионы, образовавшиеся в результате коронного разряда с антенны под обтекателем. В связи с тем что оболочка носового обтекателя имеет малую толщину, накапливаемые заряды в значительной мере будут взаимно компенсировать их действие на области пространства, находящиеся вдали от оболочки обтекателя. Поэтому процесс накопления зарядов на поверхности полового диэлектрического обтекателя может происходить в течение длительного промежутка

времени (десятьки секунд) и приводить к накоплению на поверхностях обтекателя зарядов разного знака по величине, намного больших, чем это возможно при накоплении зарядов только на одной (внешней или внутренней) поверхности.

Процесс накопления зарядов разного знака на поверхности полого диэлектрического обтекателя может быть прекращен по двум причинам [5]: либо произойдет электрический пробой оболочки обтекателя под действием электрического поля, создаваемого внутри оболочки накапливаемыми на поверхности зарядами, либо возникнут поверхностные разряды по внешней и/или внутренней поверхности обтекателя, которые обеспечат стекание накопленных поверхностных зарядов на металлические конструкции фюзеляжа самолета.

Экспериментальный комплекс состоит из аэрозольной камеры, генератора заряженного аэрозоля конденсационного типа, исследуемой модели носового обтекателя и измерительного комплекса. Параметры создаваемого заряженного аэрозольного облака и измерительного комплекса для регистрации электрических и оптических характеристик разрядных процессов в промежутке „заряженное аэрозольное облако — модель носового обтекателя с электродом внутри“ представлены в [5,6]. Используемые при экспериментах модели обтекателей с внутренним объемом до 70 л были выполнены из полиэтилентерефталата (ПЭТФ) и из полиметилметакрилата (МППА). Толщина оболочки моделей обтекателя находилась в диапазоне от 0.25 до 3.5 mm.

В ходе проведения экспериментальных исследований, при которых было выполнено более семисот подходов, зарегистрировано 25 случаев пробоя оболочки модели обтекателя. Эксперименты показали, что в большинстве случаев (более 90%) электрический пробой оболочки модели обтекателя происходит без какого-либо явного развития разряда между облаком заряженного водного аэрозоля и моделью антенны под обтекателем (рис. 1). Для его осуществления оказывалось достаточным электрического поля, создаваемого зарядами различного знака, накапливающимися на внутренней и внешней поверхности полого диэлектрического обтекателя. Причем формирование электрического пробоя оболочки модели диэлектрического обтекателя сопровождалось развитием мощных поверхностных разрядов в верхней части обтекателя, в области, прилегающей к месту его пробоя.

Формирующееся при этом место пробоя оболочки обтекателя практически локализовало и „привязывало“ к себе все последующие

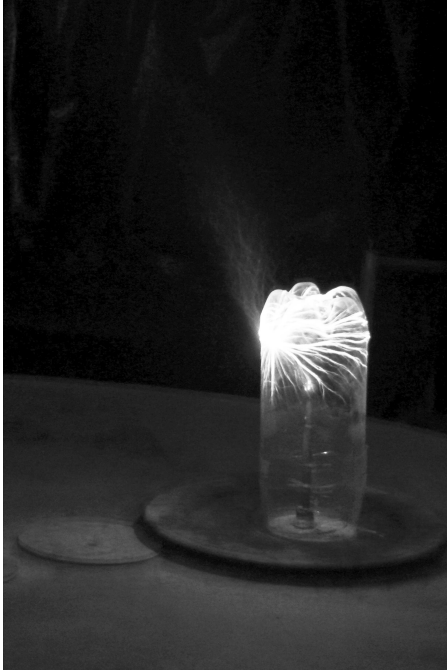


Рис. 1. Формирование пробоя оболочки модели обтекателя за счет осевших на его внутренней и внешней поверхности зарядов.

разрядные процессы, происходившие в промежутке „облако заряженного аэрозоля — модель носового обтекателя самолета“ (рис. 2). Разряд между облаком заряженного аэрозоля и моделью антенны под обкателем часто сопровождался разрядами по поверхности обтекателя, направленными к месту пробоя оболочки. Осциллограммы токов, регистрируемые в этом случае на модели антенны под полым диэлектрическим обкателем, в основном имеют многоимпульсную форму (рис. 3), за счет того что в формировании импульса тока также участвуют поверхностные разряды за счет заряда, накопленного на оболочке обтекателя. Причем даже в присутствии электродов (моделей молниеотводов) на внешней и/или внутренней поверхности полого диэлектрического обтекателя в случае электрического пробоя оболочки обтекателя поверхностные разряды в их сторону не формировались,

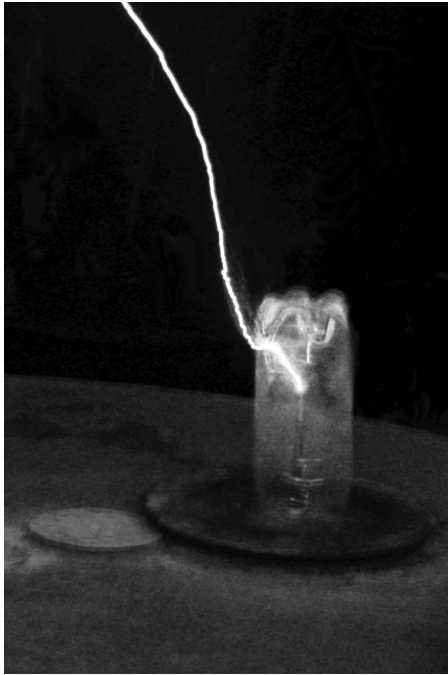


Рис. 2. Развитие разрядных процессов между облаком заряженного аэрозоля и моделью обтекателя через место пробоя его оболочки.

а развивались как раз к месту образовавшегося пробоя. Более того, при наличии места пробоя оболочки обтекателя во всех последующих разрядных процессах на модели антенны под обтекателем отсутствовал „реверсный“ разряд, который являлся доминирующим для модели обтекателя, пока тот оставался „непробитым“ [6].

Вероятности пробоя оболочки для четырех вариантов модели диэлектрического обтекателя составили от 0.013 до 0.078 (см. таблицу). Необходимо отметить, что вероятность пробоя оболочки обтекателя, хотя и существенно зависела от толщины оболочки (при экспериментах был зарегистрирован всего лишь один случай электрического пробоя оболочки обтекателя толщиной 3.5 mm), но ограничивалась в первую очередь более ранним, чем электрический пробой оболочки,

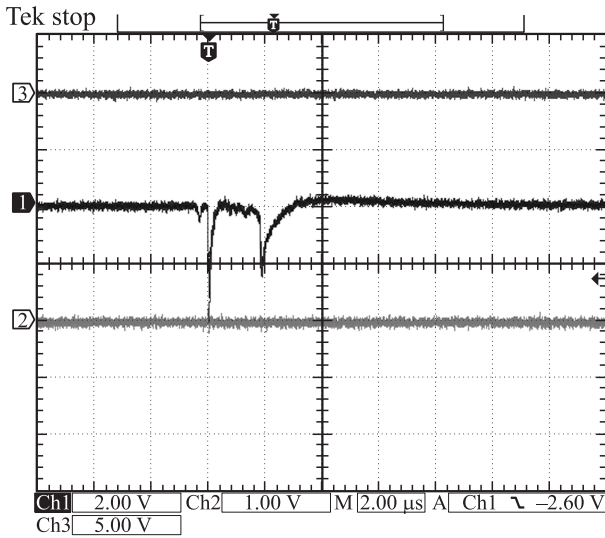


Рис. 3. Осциллограмма тока разряда с модели антенны (кривая 1, шунт 0.53Ω), полосового электрода на внутренней поверхности модели диэлектрического обтекателя (кривая 2, шунт 0.13Ω) и полосового электрода на внешней поверхности модели диэлектрического обтекателя (кривая 3, шунт 0.14Ω).

появлением разрядов по внутренней и/или внешней поверхности полого диэлектрического обтекателя.

Рассмотрим возможный механизм формирования электрического пробоя оболочки полых диэлектрических обтекателей при их взаимодействии с облаками заряженного водного аэрозоля (грозовыми облаками) и электрическими разрядами из них. Когда под полым диэлектрическим обтекателем возникает коронный разряд с антенны, то, помимо накопления отрицательного заряда на внешней поверхности σ_- , будет накопление положительного заряда на его внутренней поверхности σ_+ и могут создаться условия для пробоя оболочки обтекателя.

Условие электрического пробоя оболочки обтекателя можно представить как:

$$E_{ob} = \frac{|\sigma_+|}{2\epsilon\epsilon_0} + \frac{|\sigma_-|}{2\epsilon\epsilon_0} \geq E_{st}, \quad (1)$$

где E_{ob} — напряженность электрического поля в оболочке обтекателя; E_{st} — пробивная напряженность для материала оболочки; ϵ —

Вероятность пробоя модели носового полового диэлектрического обтекателя под воздействием облака заряженного аэрозоля

| Модель обтекателя | Материал | Объем внутреннего пространства под моделью обтекателя, l | Толщина, оболочки, mm | Электрическая прочность, kV/mm | Вероятность пробоя |
|-------------------|----------|--|-----------------------|--------------------------------|--------------------|
| Вариант 1 | ПЭТФ | 3.0 | 0.7 | 20–60 | 0.031 |
| Вариант 2 | ПММА | 69.7 | 3.5 | 15–30 | 0.013 |
| Вариант 3 | ПЭТФ | 5.8 | 0.25 | 20–60 | 0.078 |
| Вариант 4 | ПЭТФ | 3.7 | 0.5 | 20–60 | 0.052 |

относительная диэлектрическая проницаемость материала оболочки обтекателя. В (1) не учитывается влияние внешнего электрического поля грозового облака (облака заряженного аэрозоля), так как оно не является определяющим для пробоя оболочки обтекателя.

Плотность поверхностных зарядов, при которой может произойти пробой оболочки, в предположении, что $|\sigma_-| = |\sigma_+| = \sigma$:

$$\sigma = \varepsilon \varepsilon_0 E_{st}. \quad (2)$$

Например, для обтекателей, изготовленных на основе ПММА, у которого значение $\varepsilon = 2.84$: $\sigma = 2.84 \cdot 8.85 \cdot 10^{-12} \cdot 2 \cdot 10^7 \approx 500 \cdot 10^{-6} \text{ C/m}^2$.

Обработка экспериментальных результатов показала, что в среднем плотность на зарядах на внутренней поверхности обтекателя может быть от $1.5 \cdot 10^{-6}$ до $680 \cdot 10^{-6} \text{ C/m}^2$. А на внешней поверхности полового диэлектрического обтекателя средние плотности поверхностного заряда могут составлять от $2.0 \cdot 10^{-6}$ до $660 \cdot 10^{-6} \text{ C/m}^2$.

Необходимо отметить, что наибольшая плотность поверхностных зарядов будет вблизи вершины обтекателя, поэтому именно там находится наиболее вероятное место пробоя. Площадь поверхности обтекателя вблизи вершины не превышает нескольких сотен квадратных сантиметров. Это значит, что для возникновения электрического пробоя оболочки на ее вершине должно накопиться более $6\text{--}8 \mu\text{C}$ поверхностного заряда. По экспериментальным данным, полученным при разрядах с использованием искусственных облаков заряженного

водного аэрозоля, поверхностные заряды могут на один-два порядка превысить указанное значение. Таким образом, вероятность накопления на поверхности обтекателя зарядов, достаточных для пробоя его оболочки, вполне реальна.

Работа выполнена в рамках реализации ФЦП „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“ на 2009–2013 годы (государственный контракт № П 1117).

Список литературы

- [1] *Uman M.A., Rakov V.A.* // Progress in Aerospace Sciences. 2003. V. 39. P. 61–81.
- [2] *Larsson A.* // C.R. Physique. 2002. V. 3. P. 1423–1444.
- [3] *Hall A.* // Proc. of the International Conference on Lightning and Static Electricity. Seattle, USA, 2005. P. 118.
- [4] *Petrov N.I., Haddad A., Griffiths H., Petrova G.N., Waters R.T.* // Proc. of the 29th International Conference on Lightning Protection. Uppsala, Sweden, 2008. P. 9–9-1.
- [5] Темников А.Г., Черненский Л.Л., Орлов А.В., Полякова О.В. // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. В. 18. С. 40–47.
- [6] Темников А.Г., Орлов А.В., Болотов В.Н., Ткач Ю.В. // ЖТФ. 2005. Т. 75. В. 7. С. 52–59.