

РАСЧЕТ КРАТЕРА ЭЛЕКТРОТЕПЛОВОГО РАЗРУШЕНИЯ НА МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ОБШИВКЕ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА ПРИ ПРЯМОМ УДАРЕ В НЕЕ МОЛНИИ

Баранов М.И., д.т.н.

НИПКИ “Молния” Национального технического университета “Харьковский политехнический институт”
Украина, 61013, Харьков, ул. Шевченко, 47, НИПКИ “Молния” НТУ “ХПИ”
тел. (0572) 40-08-41, Факс (0572) 40-01-33, E-mail: nipkimolnija@kpi.kharkov.ua

Запропонована наближена математична модель, яка дозволяє при прямому ударі блискавки (ПУБ) в металеву обшивку літального апарату (ЛА) виконати аналітичний розрахунок геометричних розмірів одиночного кратера руйнування на її поверхні, об'єму та маси матеріалу обшивки ЛА, які можуть бути унесені з нею за однократну дію ПУБ з імпульсним струмом блискавки ускладненої форми.

Предложена приближенная математическая модель, позволяющая при прямом ударе молнии (ПУМ) в металлическую обшивку летательного аппарата (ЛА) выполнять аналитический расчет геометрических размеров одиночного кратера электротеплового разрушения на ее поверхности, объема и массы материала обшивки ЛА, унесенных с нее за однократное воздействие ПУМ с импульсным током молнии усложненной формы.

ВВЕДЕНИЕ

Прямой удар молнии (ПУМ) в металлическую обшивку летательного аппарата (ЛА) вызывает появление в последнем сложных электротермических процессов, протекающих в зоне привязки на поверхности обшивки ЛА сильноточного искрового канала молнии и приводящих к локальным проплавлениям, прожогам (пробоинам) стенки обшивки ЛА и авариям с катастрофическими последствиями [1-3]. Так как среднестатистически каждый ЛА (самолет, вертолет, многоразовый космический аппарат) не реже одного раза в год подвергается воздействию ПУМ [4], характеризующегося импульсным током молнии с амплитудой в десятки (сотни) килоампер, то задача по обеспечению электротермической стойкости ЛА к воздействию на них прямых разрядов молнии становится не только актуальной, но и государственно важной. Составной частью этой прикладной задачи является выполнение численной оценки результатов электротеплового воздействия ПУМ на стенку металлической обшивки ЛА. В настоящее время отсутствуют удобные для инженерно-технических работников расчетные аналитические модели процессов и методики экспертной оценки электротеплового разрушения металлической обшивки ЛА, вызванного интенсивным кратковременным воздействием на нее ПУМ.

Целью данной статьи является разработка приближенной математической модели, описывающей разрушительные последствия электротеплового воздействия ПУМ на металлическую обшивку ЛА и которая может быть использована инженерно-техническими специалистами при практических расчетах и экспертных оценках подобных разрушений последней.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ПРИНЯТЫЕ ДОПУЩЕНИЯ

Рассмотрим электротепловое взаимодействие в воздухе сильноточного канала молнии 1 с поверхностью стенки 2 металлической обшивки ЛА (рис.). Пусть характеристики воздушной среды соответствуют нормальным атмосферным условиям (давление воздуха составляет $1,013 \cdot 10^5$ Па, а его температура равна 20°C). На практике радиус кривизны R стенки обшивки ЛА значительно больше ее толщины h ($h/R \ll 1$). В связи с чем рассматриваемую модель об-

шивки ЛА можно считать близкой к плоской. Сильноточный канал молнии в соответствии с теорией искры [5] будет представлять собой токопроводящую область цилиндрической формы наружным радиусом r_0 , контактирующую в зоне привязки с плоской поверхностью металлической обшивки ЛА. В качестве временной зависимости для импульсного тока молнии i_m согласно [1,3] примем усложненную аperiодическую форму, содержащую: импульсную составляющую с временными параметрами 2/50 мкс и амплитудой 200 кА, промежуточную составляющую амплитудой 2 кА при ее длительности 5 мс и постоянную составляющую длительностью 1 с и амплитудой 200 А. Считаем, что геометрическая форма круглого кратера разрушения наружным радиусом r_0 на поверхности обшивки ЛА соответствует шаровому сегменту высотой h_0 и внутренним радиусом R_0 (см. рис.).

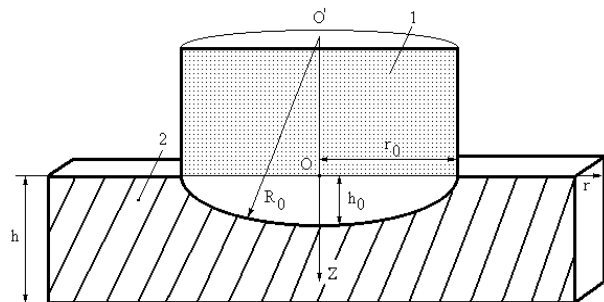


Рис. Расчетная модель обшивки ЛА при ПУМ

Влиянием теплоотдачи в окружающую обшивку ЛА воздушную среду и теплопроводности ее материала на электротепловое взаимодействие сильноточного канала молнии с поверхностью металлической обшивки ЛА пренебрегаем [3]. Примем, что при ПУМ электротепловое разрушение металлической обшивки ЛА определяется плавлением, кипением и испарением ее материала, вызванными кратковременным вводом в стенку обшивки потока тепла из сильноточного канала молнии.

Требуется с учетом принятых допущений получить соотношения для аналитического расчета размеров кратера разрушения на поверхности металлической обшивки ЛА, вызванного электротепловым воз-

действием на нее ПУМ, а также объема и массы материала стенки обшивки ЛА, унесенных с ее поверхности за одно воздействие рассматриваемого импульсного тока молнии.

ОСНОВНЫЕ РАСЧЕТНЫЕ СООТНОШЕНИЯ

На основании известных положений и теорий из электротехники и электрофизики выражение, определяющее выделяющуюся электротепловую энергию W_0 в зоне привязки сильноточного канала молнии на поверхности металлической обшивки ЛА, примет следующий вид:

$$W_0 = \int_0^{t_u} U_{\vartheta} i_M dt, \quad (1)$$

где U_{ϑ} - приэлектродное падение напряжения в зоне привязки сильноточного канала молнии; i_M - импульсный ток молнии; t_u - длительность протекания импульсного тока молнии; t - текущее значение времени.

Согласно теории искрового разряда значение U_{ϑ} представляет собой разность электрических потенциалов на границе раздела плазменный канал сильноточной искры – металлическая обшивка ЛА, которая для различных амплитудно-временных параметров (АВП) тока молнии i_M и токопроводящих материалов обшивки ЛА численно составляет величину, примерно равную 10В [1,5,6]. Тогда выражение (1) запишется в виде:

$$W_0 = 10 Q_0, \quad (2)$$

где $Q_0 = \int_0^{t_u} i_M dt$ - количество электричества, переносимое при ПУМ в металлическую обшивку ЛА сильноточным каналом молнии, контактирующим с ее наружной поверхностью.

С учетом принятых нами допущений для Q_0 будет выполняться следующее соотношение:

$$Q_0 = Q_{01} + Q_{02} + Q_{03}, \quad (3)$$

где Q_{01} , Q_{02} и Q_{03} - электрический заряд, протекающий через канал молнии за время действия соответственно импульсной, промежуточной и постоянной составляющих тока молнии.

При выбранных АВП импульсной составляющей тока молнии для Q_{01} имеем [3]:

$$Q_{01} = \beta_m I_m \cdot \int_0^{500 \text{ мкс}} [\exp(-\alpha_1 t) - \exp(-\alpha_2 t)] \cdot dt \approx \beta_m I_m (\alpha_2 - \alpha_1) / \alpha_1 \alpha_2, \quad (4)$$

где $I_m = 200 \text{ кА}$ – нормированная амплитуда импульсной составляющей тока молнии; $\alpha_1 \approx 0,76 / \tau_u = 1,529 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$; $\alpha_2 \approx 2,37 / \tau_{\phi} = 1,188 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$; $\tau_{\phi} = 2 \cdot 10^{-6} \text{ с}$ – длительность фронта импульса тока молнии между уровнями 0,1-0,9 от его амплитуды; $\tau_u = 50 \cdot 10^{-6} \text{ с}$ – длительность импульса тока молнии на уровне 0,5 от его амплитуды; $\beta_m = \left[(\alpha_1 / \alpha_2)^{\alpha_1 / (\alpha_2 - \alpha_1)} - (\alpha_1 / \alpha_2)^{\alpha_2 / (\alpha_2 - \alpha_1)} \right]^{-1} = 1,072$ – нормирующий коэффициент.

После подстановки в (4) численных значений для β_m , I_m , α_1 и α_2 получаем, что $Q_{01} = 13,84 \text{ Кл}$.

При заданных АВП промежуточной составляющей тока молнии для Q_{02} запишем:

$$Q_{02} = \int_{500 \text{ мкс}}^{5,5 \text{ мс}} i_M dt \approx 10 \text{ Кл}. \quad (5)$$

Кроме того, при принятых АВП постоянной составляющей тока молнии для Q_{03} получаем:

$$Q_{03} = \int_{5,5 \text{ мс}}^{1,0055 \text{ с}} i_M dt \approx 200 \text{ Кл}. \quad (6)$$

В результате из выражений (3)-(6) для суммарного электрического заряда Q_0 следует, что при ПУМ в металлическую обшивку ЛА с принятыми АВП импульсного тока молнии он составляет численное значение, равное $Q_0 = 223,84 \text{ Кл}$.

Можно показать, что в рассматриваемом случае выражение для объема V_0 материала обшивки ЛА, уносимого из шарового сегмента кратера электротеплового разрушения, принимает вид:

$$V_0 = 0,5 \pi r_0^2 h_0, \quad (7)$$

где $r_0 = 0,093 (I_m)^{1/3} (t_m)^{1/2}$ - максимальный радиус сильноточного канала молнии [3,5]; $t_m = \frac{\ln \alpha_2 / \alpha_1}{(\alpha_2 - \alpha_1)}$ -

время, соответствующее амплитуде I_m импульсной составляющей тока молнии; h_0 - глубина кратера разрушения на поверхности металлической обшивки ЛА.

Из (2), (7) и условия электротеплового взрывообразного разрушения (сублимации) единицы объема материала металлической обшивки ЛА для определения при ПУМ глубины h_0 (м) кратера разрушения на поверхности металлической обшивки ЛА получаем следующее выражение:

$$h_0 = \frac{2,312 \cdot 10^3 Q_0}{\pi (I_m)^{2/3} t_m W_c}, \quad (8)$$

где W_c - удельная энергия сублимации для материала металлической обшивки ЛА (для алюминия $W_c = 2,29 \cdot 10^{10} \text{ Дж/м}^3$ [7]).

Заметим, что применительно к рассматриваемой расчетной модели удельная энергия сублимации W_c равна количеству теплоты, необходимому для перевода единицы объема материала металлической обшивки ЛА в металлический пар [7,8].

Исходя из принятой геометрии кратера электротеплового разрушения, выражение для расчета его внутреннего радиуса R_0 (м) на поверхности металлической обшивки ЛА запишем в виде:

$$R_0 = \frac{1,87 \cdot 10^{-6} \pi (I_m)^{4/3} t_m^2 W_c}{Q_0}. \quad (9)$$

Из (7) и (8) окончательно для сублимируемого при ПУМ объема V_0 (м³) материала стенки металлической обшивки ЛА находим:

$$V_0 = \frac{10 Q_0}{W_c}. \quad (10)$$

Тогда с учетом (10) масса M_0 (кг) уносимого материала с поверхности металлической обшивки ЛА за один сильноточный разряд в нее молнии может быть найдена из следующего выражения:

$$M_0 = \frac{10Q_0d_0}{W_c}, \quad (11)$$

где d_0 - плотность материала металлической обшивки ЛА (для алюминия $d_0=2,71 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ [8]).

Из (8), (10) и (11) 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.

ПРИМЕР РАСЧЕТА И АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Произведем с помощью полученных формул (8)-(11) численную оценку геометрических размеров одиночного кратера электротеплового разрушения, объема и массы материала, уносимых при ПУМ с вышеуказанными АВП импульсного тока молнии с алюминиевой обшивки ЛА. При $I_m=200\text{кА}$ и $t_m=3,71\text{мкс}$ из (7) находим, что наружный радиус r_0 кратера разрушения на поверхности рассматриваемой обшивки ЛА при ПУМ составляет значение, равное $r_0=10,48\text{мм}$. Из выражений (8) и (9) при $Q_0=223,84\text{Кл}$ и $W_c=2,29 \cdot 10^{10} \text{ Дж/м}^3$ получаем, что глубина h_0 одиночного кратера разрушения в нашем случае будет примерно равна $h_0=0,57\text{мм}$, а его внутренний радиус R_0 принимает значение $R_0=96,7\text{мм}$. Далее из (10) следует, что убыль объема V_0 материала обшивки ЛА за одно воздействие ПУМ составит величину, равную примерно $V_0=97,82\text{мм}^3$. В соответствии с (11) при $d_0=2,71 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ получаем, что унесенная сильноточным разрядом молнии масса M_0 материала алюминиевой обшивки ЛА оказывается примерно равной $M_0=265\text{мг}$. Для сравнения с полученными численными данными электротеплового разрушения при ПУМ алюминиевой обшивки ЛА приведем ниже результаты приближенного расчета электрической эрозии массивных алюминиевых электродов высоковольтных сильноточных искровых разрядников, коммутирующих в воздухе при нормальных атмосферных условиях затухающий по экспоненте синусоидальный ток, характеризующийся следующими параметрами: $I_m=200\text{кА}$; $t_m=3,71\text{мкс}$; $\Delta=1,3$ (декремент колебаний тока); $\delta=17,65 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$ (коэффициент затухания тока); $\omega=423,4\text{кГц}$ (круговая частота тока). Для этого случая протекающий через алюминиевые электроды сильноточного разрядника электрический заряд Q_3 принимает значение $Q_3=0,5\text{Кл}$, а убыль их массы M_3 согласно (11) за один разряд емкостного накопителя энергии (ЕНЭ) высоковольтной электрофизической установки

(ВЭФУ) составит примерно величину $M_3=0,593\text{мг}$. Из сопоставления приведенных данных видно, что по эрозируемой массе материала электротепловое воздействие ПУМ с указанными АВП тока молнии на алюминиевую обшивку ЛА примерно в 450 раз сильнее, чем электротепловое воздействие сильноточного канала разряда с той же амплитудой тока на алюминиевые электроды воздушного разрядника атмосферного давления ВЭФУ с ЕНЭ.

ВЫВОДЫ

1. Получены формулы (8)-(11) для приближенного расчета глубины h_0 и внутреннего радиуса R_0 круглого кратера электротеплового разрушения наружным радиусом r_0 , объема V_0 и массы M_0 материала, уносимых с поверхности металлической обшивки ЛА за однократное воздействие на нее сильноточного разряда молнии.

2. При ПУМ в алюминиевую обшивку ЛА выброс металла из зоны привязки сильноточного канала молнии с принятыми АВП импульсного тока в несколько сотен раз превышает разовый выброс металла из алюминиевых электродов высоковольтных сильноточных искровых разрядников с воздушной рабочей средой атмосферного давления, предназначенных для коммутации в разрядной цепи ВЭФУ с ЕНЭ больших импульсных токов соответствующей рассмотренному ПУМ амплитуды, изменяющихся во времени по закону экспоненциально затухающей синусоиды.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Юман М.А. Естественная и искусственно инициированная молния и стандарты на молниезащиту// Труды ИИЭР.-1988.-т.76.-№12.-С.5-26.
- [2] Абрамов Н.Р., Кузнецкин И.П., Ларионов В.П. Характеристики проплавления стенок металлических объектов при воздействии на них молнии// Электричество.-1986.-№11.-С.22-27.
- [3] Баранов М.И. Моделирование электромагнитного эффекта при прямом ударе молнии в металлическую обшивку летательного аппарата// Технічна електродинаміка.-1999.-№1.-С.16-21.
- [4] Радиоэлектронные средства и мощные электромагнитные помехи/ Под ред. В.И. Кравченко.-М.: Радио и связь, 1987.-256с.
- [5] Лозанский Э.Д., Фирсов О.Б. Теория искры.-М.: Атомиздат, 1975.-272с.
- [6] Финкельбург В., Меккер Г. Электрические дуги и термическая плазма/ Пер. с нем. под ред. В.А. Фабриканта.- М.: Изд-во ИЛ, 1961.-370с.
- [7] Столович Н.Н. Электровзрывные преобразователи энергии/ Под ред. В.Н. Карношина.-Минск: Наука и техника, 1983.-151с.
- [8] Кухлинг Х. Справочник по физике/ Пер. с нем. под ред. Е.М. Лейкина.-М.: Мир, 1982.-520с.

Поступила 25.06.2003