

ДВУМЕРНАЯ ЭЛЕКТРОТЕПЛОВАЯ ЗАДАЧА ДЛЯ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ОБШИВКИ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НА НЕЕ МОЛНИИ

Баранов М.И., д.т.н., Носенко М.А.

НИПКИ "Молния" Национального технического университета

"Харьковский политехнический институт"

Украина, 61013, Харьков, ул. Шевченко, 47, НИПКИ "Молния" НТУ "ХПИ"

тел. (057) 707-68-41, факс (057) 707-61-33, e-mail: nipkimolnija@kpi.kharkov.ua

У наближенні двомірного температурного поля приведені результати уточненого аналітичного розрахунку перевищення температури у зоні прив'язки сильноточного іскрового каналу блискавки на плоскій поверхні металевої обшивці літального апарату (ЛА). Показано, що за рахунок електротеплової дії імпульсна складова повного струму блискавки часової форми 2/50 мкс з амплітудою 200 кА та тривалістю у 500 мкс викликає лише приповерхнє локальне руйнування алюмінієвої стінки обшивки ЛА, а його постійна складова амплітудою 200 А та тривалістю у 1с може забезпечувати її проплавлення на значну глибину.

В приближении двумерного температурного поля приведены результаты уточненного аналитического расчета превышения температуры в зоне привязки сильноточного искрового канала молнии на плоской поверхности металлической обшивки летательного аппарата (ЛА). Показано, что за счет электротеплового действия импульсная составляющая полного тока молнии временной формы 2/50 мкс с амплитудой 200 кА и длительностью в 500 мкс вызывает лишь приповерхностное локальное разрушение алюминиевой стенки обшивки ЛА, а его постоянная составляющая амплитудой 200 А и длительностью в 1 с может обеспечивать ее проплавление на значительную глубину.

ВВЕДЕНИЕ

Прикладная проблема обеспечения безопасности полетов в воздушном пространстве летательных аппаратов (ЛА) различного типа и назначения имела как раньше, так имеет и сейчас во всем мире повышенную актуальность и большую практическую значимость. Из обширной мировой практики эксплуатации ЛА известно, что прямой удар молнии (ПУМ) в ЛА обычно приводит к тяжёлым авариям с возможными катастрофическими последствиями для авиационной и ракетно-космической техники [1-3]. Известно и то, что каждый эксплуатируемый самолет среднестатистически один раз в год подвергается прямому воздействию грозового разряда (молнии) [4]. Основными поражающими факторами молнии, на наш взгляд, являются такие: во-первых, мощные импульсные электромагнитные поля от далекого или близкого сильноточного искрового грозового разряда, вызывающие появление в бортовых электрических цепях ЛА больших электрических наводок (индуцированных высокочастотных напряжений и токов) [5]; во-вторых, большие переносимые электрические заряды (в сотни кулон) и соответственно большие импульсные токи микро – и миллисекундного временного диапазона (в сотни килоампер) в канале длинного искрового разряда молнии, обуславливающие при ПУМ протекание в зоне привязки ее сильноточного канала на обшивке ЛА и зоне растекания по ней и наружным (внутренним) проводникам тока молнии интенсивных электротепловых процессов [6, 7]; в-третьих, сверхвысокие импульсные электрические напряжения (амплитудой свыше 1МВ), негативно воздействующие при ПУМ на конструкционные металлические (изоляционные) материалы и отдельные элементы планера ЛА; в-четвертых, большие ударные электродинамические силы и соответственно механические напряжения, действующие на металлическую (композиционную) обшивку ЛА в зоне привязки на ней сильноточного канала молнии и стремящиеся нарушить ее герметичность [8]. Данные электромагнитные факторы в своей совокупности представляют

серьезную угрозу для любого ЛА, оказавшегося в поле или на земле в зоне действия такого глобального природного электрофизического явления как молния.

Из известных работ, посвященных приближенным расчетам теплового действия сильноточного канала молнии на металлическую обшивку ЛА, следует указать [9-12]. Эти исследования содержат, в основном, одномерные математические модели температурного поля в зоне прямого электротеплового действия сильноточного канала молнии на плоскую стенку металлической обшивки ЛА, которые лишь в грубом приближении отражают сложные дву- и трехмерные нестационарные электротермические процессы, протекающие в указанной обшивке ЛА при ПУМ.

Целью статьи является разработка уточненной математической модели электротепловых процессов в круговой зоне действия ПУМ на металлическую обшивку ЛА, предназначенной для приближенного аналитического расчета двумерного температурного поля стенки металлической обшивки ЛА в области опорной зоны сильноточного канала молнии как на временном участке с относительно короткой нарастающей токовой частью грозового разряда и максимальным значением импульсной составляющей полного тока молнии, так и на временном участке с относительно длинной спадающей токовой частью грозового разряда и минимальным значением постоянной составляющей полного тока молнии.

1. ПРИНЯТЫЕ ДОПУЩЕНИЯ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Рассмотрим в цилиндрической системе координат электротепловое воздействие сильноточного искрового канала 1 грозового разряда на стенку 2 металлической обшивки ЛА толщиной h , размещенной в воздушном пространстве (рис. 1). Пусть характеристики воздушной среды соответствуют нормальным атмосферным условиям (давление воздуха составляет $1,013 \cdot 10^5$ Па, а влажность воздуха и его температура соответственно – 80% и 20 °С). В первом приближении примем, что искровой канал молнии представляет

собой сплошной проводящий цилиндр радиусом r_0 , состоящий из низкотемпературной плазмы [13]. В связи с тем, что в реальных условиях радиус кривизны металлической обшивки ЛА значительно превышает толщину h ее стенки, то поверхность кругового контакта сильноточного искрового канала молнии с наружной поверхностью обшивки можно считать близкой к плоской поверхности [9-12].

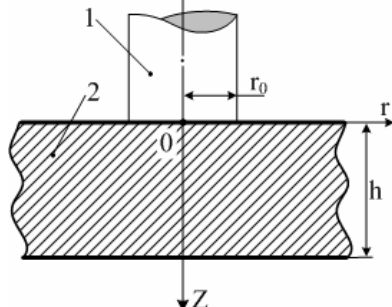


Рис. 1. Упрощенная расчетная модель стенки металлической обшивки ЛА при воздействии на нее ПУМ

Считаем, что импульсное электротепловое действие сильноточного цилиндрического канала молнии на металлическую обшивку ЛА аналогично действию во времени t непрерывного поверхностного точечного источника тепла [12]. Решение для такого теплового источника временного действия можно известным путем получить с помощью фундаментального аналитического решения для случая мгновенного точечного источника тепла в виде диска радиусом r_0 , приложенного в плоскости $z=0$ в момент времени $t=0$ к наружной поверхности обшивки в опорной круговой зоне привязки канала искрового разряда [14, 15]. При этом неравномерностью распределения плотности электрического тока молнии i_M по поперечному сечению рассматриваемого искрового канала разряда и соответственно неравномерностью плотности импульсного теплового потока в круговой опорной зоне искрового канала молнии радиусом r_0 , поступающего для $0 \leq t \leq t_0$ в металлическую обшивку ЛА, пренебрегаем. Кроме того, согласно известным экспериментальным исследованиям приэлектродных областей дугового разряда в воздухе в них (этих областях) опорная зона разряда как бы "следит" за изменением тока [16]. В этой связи средняя плотность тока разряда, равная отношению полного тока разряда в данный момент времени t к площади круговой опорной зоны канала разряда на поверхности электрода в этот же временной момент, практически не изменяется во времени t . Поэтому неизменной остается и средняя плотность q_0 поверхностного теплового потока, воздействующего со стороны плазменного канала разряда на металлический электрод (например, на анод двухэлектродной системы). Это обстоятельство для нашего случая позволяет при расчетной оценке действующей для $z=0$ на стенку металлической обшивки ЛА плотности $q(t)$ импульсного поверхностного теплового потока от сильноточного искрового канала молнии обоснованно использовать в динамике один из фиксированных моментов времени t в изменении импульса тока молнии i_M (например, время t_m , соответствующее его амплитуде I_m) и соответственно

понятие усредненной плотности q_0 поверхностного теплового потока, импульсно воздействующего на стенку обшивки ЛА в период времени $0 \leq t \leq t_0$. Учитывая быстропротекающий импульсный характер локального электротеплового нагрева (в течение не более 1000мс) стенки металлической обшивки ЛА за счет выделяющегося в ней "джоулево" тепла, влиянием теплоотдачи в окружающее стенку обшивку воздушное пространство на протекающие в ней в зоне привязки сильноточного искрового канала молнии электротепловые процессы пренебрегаем.

Принимая во внимание приближенный характер выполняемого нами аналитического расчета распределения двумерного температурного поля в стенке металлической обшивки ЛА, испытывающей действие ПУМ, изменениями коэффициента теплопроводности λ_0 (Дж/м·с·°С), удельной объемной теплоемкости c_0 (Дж/м³·°С) и теплового коэффициента удельной электропроводности β_0 (м³/Дж) материала исследуемой обшивки, вызванными его импульсным электротепловым нагревом практически в адиабатическом режиме, можно также пренебречь. Исследование импульсного нагрева рассматриваемой стенки обшивки ЛА за счет кратковременного ввода в нее теплового потока от сильноточного канала молнии не будем ограничивать для данной задачи температурой испарения $T_{И}$ ее материала. На этом этапе исследований в рамках предлагаемой уточненной двумерной математической модели электротепловых процессов в металлической обшивке ЛА рассмотрим результаты воздействия на плоскую стенку металлической обшивки ЛА вначале импульсной составляющей с временными параметрами 2/50 мкс (ее амплитуда равна 200 кА, а длительность – $t_0 = 500$ мкс), а затем постоянной составляющей амплитудой 200 А и длительностью в $t_0 = 1000$ мс полного тока молнии i_M [1, 3].

Таким образом, требуется в приближенном виде с учетом принятых допущений получить аналитические соотношения, описывающие двумерное температурное поле в зоне привязки сильноточного канала молнии на плоской металлической обшивке ЛА, и с помощью результатов известных экспериментальных лабораторных исследований по определению последствий имитационного воздействия сильноточного грозового искрового разряда на опытные образцы металлической обшивки ЛА выполнить оценку работоспособности (достоверности) этих соотношений.

2. ОСНОВНЫЕ РАСЧЕТНЫЕ СООТНОШЕНИЯ ПРЕДЛАГАЕМОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Расчет двумерного температурного поля стенки обшивки ЛА. На основании известного из теории теплопроводности твердых тел фундаментального решения применительно к мгновенному точечному источнику тепла дисковой формы, воздействующему на плоскую наружную поверхность полубесконечного (массивного в электромагнитном и тепловом смысле) тела, для пространственно-временного изменения превышения температуры $\theta(r, z, t)$ материала рассматриваемой плоской стенки металлической обшивки ЛА конечной толщиной h в круговой зоне действия на нее во времени t поверхностного теплового потока плотностью $q(t)$ от плазменного сильноточного канала

молнии можно записать следующее приближенное аналитическое выражение [15, 17]:

$$\theta(r, z, t) = \frac{r_0}{(\pi\lambda_0 c_0)^{1/2}} \int_0^{t_0} q(\tau) F(r, z, t - \tau) d\tau, \quad (1)$$

где $\theta(r, z, t) = \theta_t - \theta_0$; θ_t – текущая температура материала стенки обшивки ЛА; θ_0 – температура окружающего стенку обшивки ЛА воздуха, равная в нашем случае $\theta_0 = 20$ °С; r – радиальная координата, направленная от оси канала молнии вдоль стенки обшивки ЛА; z – продольная координата, направленная от очага теплового воздействия молнии внутрь стенки обшивки ЛА; $q(\tau)$ – плотность воздействующего на металлическую стенку обшивки ЛА теплового потока, вызванного плазменным каналом молнии ($\text{Вт}/\text{м}^2$);

$$F(r, z, t - \tau) = \exp[-z^2 c_0 / 4\lambda_0(t - \tau)] \times (t - \tau)^{-1/2} \int_0^\infty \exp[-\lambda_0(t - \tau)v^2 / c_0] J_0(vr) J_1(vr_0) dv;$$

τ, v – вспомогательные переменные; t – текущее время; t_0 – длительность протекания импульсной (постоянной) составляющей полного тока i_M молнии; J_0, J_1 – соответственно функции Бесселя первого рода нулевого и первого порядков.

В принятой постановке решаемой задачи для плотности импульсного поверхностного теплового потока $q(\tau)|_{\tau=t} = q_0$, имеющего форму диска наружным радиусом r_0 и воздействующего на стенку обшивки ЛА в зоне с координатами $z = 0$ и $0 \leq r \leq r_0$, в общем виде можно записать нижеследующее выражение:

$$q(t) = i_M U_0 (\pi r_0^2)^{-1}, \quad (2)$$

где i_M – полный ток молнии; U_0 – приэлектродное (канальное) падение электрического напряжения в опорной зоне искрового сильноточного канала молнии.

Из теории сильноточной искры следует, что величина напряжения U_0 представляет собой разность электрических потенциалов на границе раздела "плазменный канал молнии – металлический электрод", которая для различных амплитудно-временных параметров (АВП) тока искры (молнии) и токопроводящих материалов электродов (обшивки ЛА) численно составляет значение, примерно равное $U_0 = 10$ В [1, 3, 18]. Тогда выражение (2) для плотности теплового потока $q(t)$, являющейся одной из основных теплофизических характеристик, определяющих численное значение превышения температуры $\theta(r, z, t)$ в исследуемой стенке металлической обшивки ЛА, принимает такой окончательный и упрощенный вид:

$$q(t) = 10 i_M (\pi r_0^2)^{-1}. \quad (3)$$

Важной с практической и интересной с методической стороны характеристикой распределения температурного поля в стенке исследуемой обшивки ЛА является глубина проникновения Δ_T в нее теплового потока [19], на которой превышение температуры $\theta(r, z, t)$ уменьшается в e раз. Из (1) аналогично [12] можно также получить приближенное выражение для глубины проникновения Δ_T в металлическую стенку обшивки ЛА поверхностного теплового потока от

источника, равномерно распределенного по опорной зоне плазменного канала молнии и действующего на стенку обшивки ЛА в течение времени t_0 :

$$\Delta_T = 2(\lambda_0 t_0 / c_0)^{1/2}. \quad (4)$$

Соотношение (4) полностью соответствует ранее известным в электрофизике [12, 17, 19] и лазерной (электронно-лазерной) технике [20] формулам для вычисления величины Δ_T . В дальнейшем при исследовании распределения двумерного температурного поля в плоской стенке обшивки ЛА ограничимся рассмотрением в ней максимальных уровней превышения температуры $\theta(r, z, t)$, соответствующих наибольшим значениям плотности $q(t) = q_0$ воздействующего теплового потока и амплитудным значениям импульсной (постоянной) составляющей тока молнии. **Воздействие на стенку обшивки ЛА импульсной составляющей тока молнии.** В данном случае для импульсной аperiодической составляющей полного тока i_M молнии, характеризующейся временной формой 2/50 мкс, амплитудой I_m и значением длительности ее протекания $t_0 = 500$ мкс, имеем [2, 3]:

$$i_M = \beta_m I_m \cdot [\exp(-\alpha_1 t) - \exp(-\alpha_2 t)], \quad (5)$$

где $I_m = 200$ кА – нормированная требованиями межгосударственного ГОСТ 30585-98 [21] амплитуда импульсной составляющей полного тока сильноточного грозового искрового разряда (молнии);

$$\alpha_1 \approx 0,76 / \tau_{\text{и}} = 1,529 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1};$$

$$\alpha_2 \approx 2,37 / \tau_{\text{ф}} = 1,188 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1};$$

$\tau_{\text{ф}} = 2 \cdot 10^{-6}$ с – длительность фронта импульсной составляющей полного тока молнии между уровнями 0,1-0,9 от его амплитуды; $\tau_{\text{и}} = 50 \cdot 10^{-6}$ с – длительность импульсной составляющей полного тока молнии на уровне 0,5 от токовой амплитуды I_m ; $\beta_m = \left[(\alpha_1 / \alpha_2)^{\alpha_1 / (\alpha_2 - \alpha_1)} - (\alpha_1 / \alpha_2)^{\alpha_2 / (\alpha_2 - \alpha_1)} \right]^{-1} = 1,072$ – нормирующий коэффициент [2, 3].

Для определения на стадии протекания импульсной составляющей полного тока i_M молнии максимального значения радиуса плазменного канала сильноточного искрового разряда, соответствующего токовой амплитуде I_m , и соответственно радиуса r_0 (м) его круглой опорной зоны на плоской стенке металлической обшивки ЛА воспользуемся известной формулой Брагинского, которая при принятых допущениях имеет такой вид [2, 18]:

$$r_0 = 0,093 (I_m)^{1/3} (t_m)^{1/2}, \quad (6)$$

где $t_m = \ln(\alpha_2 / \alpha_1) / (\alpha_2 - \alpha_1)$ – время (с), соответствующее амплитуде I_m (А) импульсной составляющей полного тока молнии (при указанных выше коэффициентах ее формы α_1 и α_2 величина t_m численно составляет значение, равное примерно $t_m = 3,71$ мкс).

В результате для рассматриваемого случая, когда $q(t) = q_0$, после подстановки выражений (3) – (6) в (1) для максимального превышения температуры $\theta(r, z, t)$ материала стенки металлической обшивки ЛА на стадии воздействия на нее импульсной составляющей полного тока i_M молнии за время длитель-

ности t_0 ее протекания, примерно численно равной $t_0=500$ мкс [1, 3], в безразмерном виде получаем:

$$\theta^*(r^*, z^*, t_0^*) = \left[\frac{10I_m c_0 \beta_0}{\pi^{3/2} \lambda_0 r_0} \right] \cdot \int_0^{t_0^*} F(r^*, z^*, t_0^* - \tau^*) d\tau^*, \quad (7)$$

где $F(r^*, z^*, t_0^* - \tau^*) = \exp[-(z^*)^2 / 4(t_0^* - \tau^*)] \times$

$$\times (t_0^* - \tau^*)^{-1/2} \int_0^\infty \exp[-(t_0^* - \tau^*)v^2] J_0(vr^*) J_1(v) dv;$$

$\theta^*(r^*, z^*, t_0^*) = \theta(r^*, z^*, t_0^*) / \theta_b$; $\theta_b = (c_0 \beta_0)^{-1}$ – базисная температура; $r^* = r / r_0$; $z^* = z / r_0$; $t_0^* = t_0 / t_b$; $\tau^* = \tau / t_b$; $t_b = c_0 r_0^2 / \lambda_0$ – базисное время.

На рис. 2 приведена безразмерная графическая зависимость $\theta^*(r^*, z^*, t_0^*)$, построенная по (7) в случае воздействия импульсной составляющей полного тока i_M молнии на алюминиевую стенку обшивки ЛА при следующих исходных расчетных данных для рассматриваемой электротепловой задачи [3, 12, 22]: $I_m=200$ кА; $t_m=3,71$ мкс; $t_0=500$ мкс; $r_0=10,48$ мм; $h=10$ мм; $c_0=2,7 \cdot 10^6$ Дж/м³·°С; $\beta_0=2,14 \cdot 10^{-9}$ м³/Дж; $\theta_b=173$ °С; $\lambda_0=240$ Дж/м·с·°С. Из данных рис.2 видно, что за время действия t_0 на алюминиевую стенку обшивки ЛА импульсной составляющей полного тока i_M молнии с принятыми нами АВП максимальное значение превышения температуры ее материала в эпицентре электротермического воздействия ($z^*=0$; $r^*=0$) составляет около $\theta(0,0,t_0)=34,7 \cdot \theta_b=6003$ °С. Как известно, такого превышения температуры за время электротеплового воздействия $t_0=500$ мкс под опорной зоной плазменного канала молнии вполне достаточно не только для расплавления, но и испарения поверхностного слоя алюминиевой стенки обшивки ЛА. Заметим, что температура плавления T_{II} материала исследуемой обшивки ЛА равна $T_{II}=658$ °С, а температура его испарения составляет $T_{III}=2447$ °С [7, 23]. Причем, в этом случае (кривая 1 на рис. 2) поверхностная температура остается практически одинаковой по радиусу опорной зоны канала сильнооточного искрового разряда и лишь у ее края ($r^*=1$) она испытывает резкое радиальное затухание.

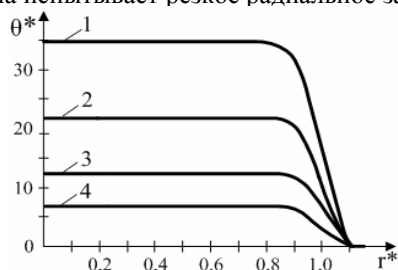


Рис. 2. Пространственное изменение безразмерного превышения температуры $\theta^*(r^*, z^*, t_0^*)$ в стенке алюминиевой обшивки ЛА на стадии воздействия на нее импульсной составляющей полного тока i_M молнии ($I_m=200$ кА; $t_0=500$ мкс; $r_0=10,48$ мм; $h=10$ мм; для кривой 1- $z^*=0$; 2- $z^*=0,01$; 3- $z^*=0,02$; 4- $z^*=0,03$)

Такое изменение превышения поверхностной температуры $\theta^*(r^*, 0, t_0^*)$ соответствует известным расчетным и экспериментальным результатам радиального распределения температуры в сильнооточном канале воздушного искрового разряда микросекундной длительности [24]. С увеличением глубины слоев материала стенки наблюдается экспоненциальный спад превышения рассматриваемой температуры $\theta^*(r^*, z^*, t_0^*)$ с сохранением указанной выше закономерности ее радиального изменения (кривые 2 – 4 на рис. 2).

Сравнение расчетных по формуле (7) и ранее полученных опытных данных для превышения температуры $\theta^*(r^*, z^*, t_0^*)$ [7] применительно к воздействию на плоскую дуралюминовую стенку обшивки ЛА ($h=10$ мм; $c_0=2,7 \cdot 10^6$ Дж/м³·°С; $\beta_0=2,14 \cdot 10^{-9}$ м³/Дж; $\theta_b=173$ °С; $\lambda_0=240$ Дж/м·с·°С) импульсной составляющей тока сильнооточного канала воздушного искрового разряда длиной, примерно равной 50 мм ($I_m=100$ кА; $t_m=4,375$ мкс; $t_0=500$ мкс; $r_0=9,03$ мм), полученного с помощью высоковольтной моделирующей установки, свидетельствует об их хорошей корреляции. Так, для приведенных выше исходных данных при $z^*=0,04$ ($z=0,36$ мм) расчетная по (7) температура $\theta_t(0, z, t_0)$ стенки опытного дуралюминового образца обшивки ЛА составила примерно $\theta_t(0, z, t_0)=531$ °С, а экспериментально зафиксированная косвенным металлографическим путем – около $\theta_t(0, z, t_0)=500$ °С. Интересно отметить, что при этом опытное определение температуры $\theta_t(0, z, t_0)$ базировалось на результатах измерения согласно требованиям ГОСТ 9450-60 по глубине образца стенки дуралюминовой обшивки ЛА микротвердости, зависящей от температурного состояния (нагружения) ее материала [7]. Указанные выше результаты дают нам основание считать расчетные соотношения (1) и (7) работоспособными и отражающими на стадии протекания импульсной составляющей тока грозового разряда основные закономерности распределения двумерного температурного поля в области привязки канала молнии на металлической обшивке ЛА. Особенности численного интегрирования в выражениях (1) и (7) с точностью вычисления порядка 10^{-8} входящих в них интегралов приведены в **Приложениях 1 и 2**.

В соответствии с полученными данными следует, что импульсная составляющая тока молнии i_M с принятыми АВП ($I_m=200$ кА) может приводить к локальному проплавлению алюминиевой стенки обшивки ЛА на глубину h_{II} не более $h_{II} \leq 0,4$ мм ($0 \leq z^* \leq 0,038$). Заметим, что при этом согласно (4) глубина проникновения Δ_T в алюминиевую стенку обшивки ЛА теплового потока от сильнооточного канала молнии принимает численное значение, равное около $\Delta_T=0,21$ мм, а в соответствии с (3) величина усредненной плотности q_0 поверхностного теплового потока оказывается примерно равной $q_0 = I_m \cdot U_0 / \pi r_0^2 = 5,79 \cdot 10^9$ Вт/м². В дальнейшем для упрощения расчетов рассмотрим независимое электротепловое действие на исследуемую стенку обшивки ЛА постоянной составляющей полного тока мол-

нии i_M , не учитывающее результатов предыдущего электротеплового воздействия на эту же стенку импульсной составляющей тока молнии.

Воздействие на стенку обшивки ЛА постоянной составляющей тока молнии. Экспериментальные данные по имитационному воздействию постоянной составляющей полного тока i_M молнии в воздушной двухэлектродной разрядной системе с алюминиевым электродом (анодом), характеризующейся практически неизменной во времени t амплитудой $I_m=200$ А и значением ее длительности $t_0=1000$ мс, свидетельствуют о том, что для этого случая электротермического нагружения алюминиевой обшивки ЛА можно использовать следующую эмпирическую зависимость максимального радиуса r_0 (м) канала искрового разряда от величины тока I_m (А) в нем [10]:

$$r_0 = 0,11 \cdot 10^{-3} (I_m)^{1/2}. \quad (8)$$

Подставив в (8) принятое нами значение амплитуды длительной составляющей полного тока молнии ($i_M = I_m = 200$ А), находим, что на стадии воздействия на исследуемую стенку обшивки ЛА практически постоянного тока ($t_0 = 1$ с) указанной силы радиус r_0 канала искрового разряда становится численно равным $r_0 = 1,55$ мм. После подстановки в выражение (7) заданных численных значений соответствующих коэффициентов и АВП постоянной (длительной) составляющей полного тока i_M молнии и численного интегрирования в нем следует, что максимальное значение превышения температуры $\theta(r^*, z^*, t_0^*)$ материала стенки алюминиевой обшивки ЛА ($h = 10$ мм) в эпицентре электротермического воздействия ($r^* = 0$; $z^* = 0$) в конце протекания постоянной составляющей тока в канале грозового разряда окажется примерно равным $\theta(0, 0, t_0) = 9,34 \theta_b = 1616$ °С (кривая 1 на рис. 3). Такая поверхностная температура материала стенки под плоской круговой областью теплового излучения от плазмы канала искрового разряда вызывает электрическую эрозию, изменение агрегатного состояния материала стенки и соответственно локальное разрушение наружной поверхности стенки алюминиевой обшивки ЛА и соответствует усредненной плотности q_0 поверхностного теплового потока от данного канала ($r_0 = 1,55$ мм) к исследуемой стенке, приближенно равной $q_0 = I_m \cdot U_0 / \pi r_0^2 = 2,65 \cdot 10^8$ Вт/м².

Из данных рис. 3 видно, что на стадии воздействия в течение времени $t_0 = 1$ с на алюминиевую обшивку ЛА постоянной составляющей тока молнии силой $I_m = 200$ А в отличие от хода кривых 1 – 4 на рис. 2 наблюдается заметное радиальное изменение превышения ее температуры $\theta(r^*, z^*, t_0^*)$ уже под опорной зоной канала молнии. Из-за высокого в материале стенки обшивки ЛА градиента температуры в радиальном направлении происходит более интенсивное радиальное перераспределение или своего рода радиальное "размытие" температуры вдоль рассматриваемой круговой области стенки. Такой ход кривых 1 – 4 на рис. 3 вдоль радиуса r может быть объяснен усилившимся за счет существенного возрастания

времени токового воздействия t_0 влиянием на распределение температуры $\theta_t(r, z, t_0)$ теплопроводности материала стенки обшивки ЛА.

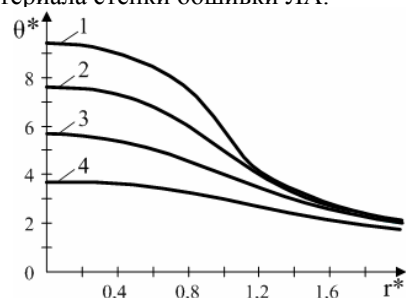


Рис. 3. Пространственное изменение безразмерного превышения температуры $\theta^*(r^*, z^*, t_0^*)$ в стенке алюминиевой обшивки ЛА на стадии воздействия на нее постоянной (длительной) составляющей полного тока i_M молнии ($I_m = 200$ А; $t_0 = 1000$ мс; $r_0 = 1,55$ мм; $h = 10$ мм; для кривой 1- $z^* = 0$; 2- $z^* = 0,2$; 3- $z^* = 0,5$; 4- $z^* = 1,0$)

Что касается величины глубины проникновения Δ_T температурного поля в стенку, то здесь она согласно формуле (4) принимает расчетное численное значение $\Delta_T = 18,85$ мм. Несмотря на такое большое значение Δ_T , в случае электротеплового действия на алюминиевую стенку обшивки ЛА постоянной составляющей тока молнии с принятыми АВП расчетная по (7) глубина ее проплавления h_{Π} составляет примерно не более $h_{\Pi} \leq 1,5$ мм ($0 \leq z^* \leq 0,95$).

Приложение 1. На рис. П1 приведена блок-схема вычисления интеграла от обобщенной функции $F(x)$ методом Симпсона (методом парабол) с заданной точностью [25], использованная нами при численном интегрировании внутреннего несобственного интеграла вида $\int_0^{\infty} F(x) dx$ в выражениях (1) и (7). При этом

данный несобственный интеграл вида $\int_0^{\infty} F(x) dx$ был "усечен" и приближенно заменен на определенный

интеграл вида: $\int_0^b F(x) dx$. Параметр "усечения" b в

последнем интеграле численно выбирался таким образом, чтобы выполнялось следующее неравенство: $\int_b^{\infty} F(x) dx \leq \varepsilon / 2$, где ε – допустимая неточность (b (ошибка) вычисления. Согласно рис. П1 в нашем случае $a = 0$, а $\varepsilon = 10^{-8}$.

Проведенный согласно разработанной блок-схеме, изображенной на рис. П1, численный эксперимент показал, что в указанном выше усеченном определенном интеграле параметр b может принимать численное значение $b \geq 320$, обеспечивающее при используемых нами АВП импульсной (постоянной) составляющей полного тока молнии i_M получение интегрального остатка ε не более 10^{-8} .

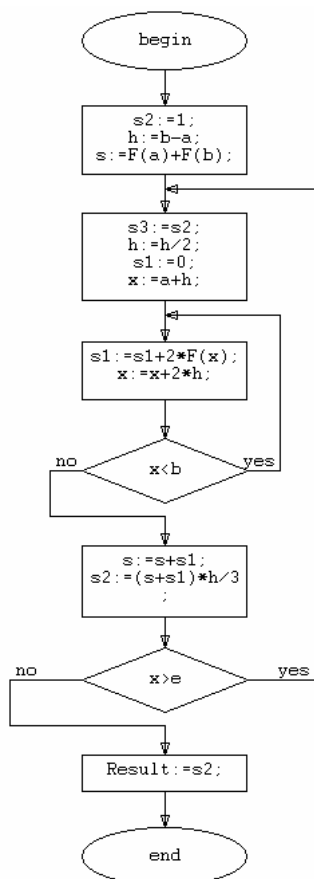


Рис. П1. Блок-схема вычисления интеграла от обобщенной функции $F(x)$ методом Симпсона

Приложение 2. Вычисление в расчетных выражениях (1) и (7) наружного определенного интеграла вида $\int_0^{t_0^*} f(\tau) d\tau$ выполнялось с использованием квадратурной формулы Гаусса–Лежандра [25]. Для этого была составлена подпрограмма определения узлов и весов в квадратурной формуле Гаусса–Лежандра. Данная подпрограмма на входе выбирала требуемое число узлов, а на выходе возвращала в основную программу вычисления превышения температуры стенки металлической обшивки ЛА массив узлов и массив весовых коэффициентов с нумерацией элементов от 0 до $n-1=M-1$. В табл. П.1 и П.2 приведены численные значения первых десяти соответственно узлов x_i и весов w_i квадратурной формулы Гаусса–Лежандра, которые были использованы нами при численном интегрировании с точностью порядка 10^{-8} в выражениях (1) и (7).

Таблица П.1

Узлы x_i квадратурной формулы Гаусса–Лежандра

x_0	$9,73906528517172 \cdot 10^{-1}$
x_1	$8,65063366688985 \cdot 10^{-1}$
x_2	$6,79409568299024 \cdot 10^{-1}$
x_3	$4,33395394129247 \cdot 10^{-1}$
x_4	$1,48874338981631 \cdot 10^{-1}$
x_5	$-1,48874338981631 \cdot 10^{-1}$
x_6	$-4,33395394129247 \cdot 10^{-1}$
x_7	$-6,79409568299024 \cdot 10^{-1}$
x_8	$-8,65063366688985 \cdot 10^{-1}$
x_9	$-9,73906528517172 \cdot 10^{-1}$

Таблица П.2

Весы w_i квадратурной формулы Гаусса–Лежандра

w_0	$6,66713443086836 \cdot 10^{-2}$
w_1	$1,49451349084399 \cdot 10^{-1}$
w_2	$2,19086362515287 \cdot 10^{-1}$
w_3	$2,69266719309992 \cdot 10^{-1}$
w_4	$2,95524224714753 \cdot 10^{-1}$
w_5	$2,95524224714753 \cdot 10^{-1}$
w_6	$2,69266719309992 \cdot 10^{-1}$
w_7	$2,19086362515287 \cdot 10^{-1}$
w_8	$1,49451349084399 \cdot 10^{-1}$
w_9	$6,66713443086836 \cdot 10^{-2}$

В результате на основе расчетного соотношения (7) и квадратурной формулы Гаусса–Лежандра выражение для вычисления безразмерного превышения температуры $\theta^*(r^*, z^*, t_0^*)$ в исследуемой стенке металлической обшивки ЛА с импульсной (постоянной) составляющей полного тока молнии i_M может быть представлено в следующем виде:

$$\theta^*(r^*, z^*, t_0^*) = \left[\frac{5I_M c_0 \beta_0 h \tau}{\pi^{3/2} \lambda_0 r_0} \right] \cdot \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{i=1}^M F_{ki}, \quad (\text{П.1})$$

где

$$F_{ki} = w_i \cdot \exp[-(z^*)^2 / 4(t_0^* - \tau_{ki}^*)] \times$$

$$(t_0^* - \tau_{ki}^*)^{-1/2} \int_0^\infty \exp[-(t_0^* - \tau_{ki}^*)v^2] J_0(vr^*) J_1(v) dv;$$

$\tau_{ki}^* = 0,5[2\tau_k + h_\tau(1 + x_i)]$; $\tau_k = kh_\tau$; $h_\tau = t_0^* / N$ – шаг по времени t_0^* ; N – число участков разбиения на временном отрезке интегрирования $[0, t_0^*]$; x_i – узлы квадратурной формулы Гаусса–Лежандра; w_i – веса квадратурной формулы Гаусса–Лежандра; M – число узлов на каждом участке разбиения временного отрезка интегрирования $[0, t_0^*]$; $k = 0, 1, 2, \dots, N-1$; $i = 0, 1, 2, \dots, M$.

Выполненный по выражению (П.1) численный эксперимент показал, что при решении рассматриваемой двумерной электротепловой задачи для обеспечения заданной точности вычисления порядка 10^{-8} превышения температуры $\theta^*(r^*, z^*, t_0^*)$ в алюминиевой стенке толщиной h , испытывающей внезапное воздействие импульсной (постоянной) составляющей полного тока молнии i_M , число участков разбиения N на временном отрезке интегрирования $[0, t_0^*]$ должно составлять $N=1000$, а число узлов M на каждом участке разбиения временного отрезка интегрирования $[0, t_0^*]$ – соответственно $M=10$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана приближенная математическая модель двумерного температурного поля в области опорной круговой зоны радиусом r_0 сильноточного искрового канала грозового разряда на наружной плоской поверхности металлической обшивки ЛА, внезапно испытывающей в атмосферном воздухе прямое мощное электротепловое воздействие молнии.

2. Показано, что импульсная составляющая полного тока молнии i_M временной формы 2/50 мкс, характеризующаяся токовой амплитудой $I_m=200$ кА и полной длительностью ее протекания $t_0=500$ мкс, осуществляет в круговой опорной зоне канала молнии радиусом r_0 лишь приповерхностное оплавление и разрушение алюминиевой стенки обшивки ЛА на глубину h_{II} не более $h_{II} \leq 0,4$ мм.

3. Установлено, что постоянная (длительная) составляющая полного тока молнии i_M , характеризующаяся токовой амплитудой $I_m=200$ А и длительностью ее протекания $t_0=1$ с, вызывает в круговой опорной зоне канала молнии радиусом r_0 и вблизи нее электрическую эрозию исследуемой стенки, агрегатные изменения в материале металлической обшивки ЛА и может приводить к проплавлению алюминиевой стенки обшивки ЛА на глубину h_{II} не более $h_{II} \leq 1,5$ мм.

4. Пренебрегать влиянием импульсной составляющей полного тока молнии i_M с принятыми АВП на протекающие при ПУМ в металлической стенке обшивки ЛА нестационарные электротермические процессы нельзя.

5. Выполненное сравнение результатов расчета по предложенным формулам (1) и (7) температуры электротеплового нагрева $\theta_t(r, z, t_0)$ алюминиевой стенки обшивки ЛА в случае внезапного воздействия на нее в атмосферном воздухе силовоточного канала искрового грозового разряда и известных экспериментальных данных, связанных с ее (стенки) импульсным нагревом за счет джоулева тепла от имитируемого в лабораторных условиях силовоточного канала молнии, подтверждает работоспособность (достоверность) предложенной математической модели двумерного температурного поля в зоне прямого действия молнии на металлическую обшивку ЛА.

6. Полученные результаты расчета двумерного температурного поля в плоской стенке металлической обшивки ЛА позволяют заключить, что при ПУМ с принятыми АВП полного тока молнии i_M для обеспечения безопасности полетов ЛА в земной атмосфере в условиях грозовой деятельности минимальная толщина h алюминиевой стенки рассматриваемой обшивки должна составлять $h \geq 2$ мм.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Юман М.А. Естественная и искусственно инициированная молния и стандарты на молниезащиту // Труды американского ИИЭР. - 1988. - №12. - С. 5-26.
 [2] Баранов М.И. Моделирование электромагнитного эффекта при прямом ударе молнии в металлическую обшивку летательного аппарата // Технічна електродинаміка. - 1999. - №1. - С. 16-21.
 [3] Баранов М.И. Расчет кратера электротеплового разрушения на металлической обшивке летательного аппарата при прямом ударе в нее молнии // Електротехніка і електромеханіка. - 2003. - №4. - С. 101-103.
 [4] Кравченко В.И., Болотов Е.А., Летунова Н.И. Радиоэлектронные средства и мощные электромагнитные помехи / Под ред. В.И. Кравченко. - М.: Радио и связь, 1987. - 256 с.
 [5] Борисов Р.К., Григорьев О.А., Ларионов В.П. Методы испытания бортового оборудования летательных аппаратов на молниестойкость // Электричество. - 1993. - №7. - С. 21-27.

[6] Баранов М.И., Бондина Н.Н. Нестационарные электромагнитные и тепловые процессы в цилиндрических проводниках при воздействии на них молнии // Электричество. - 1992. - №10. - С. 9-15.
 [7] Баранов М.И., Белозеров В.В., Кравченко В.И., Махатилова А.И. Экспериментальные исследования электротеплового воздействия импульсного силовоточного искрового разряда на металлическую обшивку летательного аппарата // Технічна електродинаміка. - 2003. - №1. - С. 3-7.
 [8] Баранов М.И. Моделирование электромеханического эффекта при прямом ударе молнии в металлическую обшивку летательного аппарата // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Електроенергетика і перетворююча техніка. - Харків: НТУ "ХПІ". - 2002. - №7. - С. 58-70.
 [9] Абрамов Н.Р., Кужекин И.П., Ларионов В.П. Характеристики проплавления стенок металлических объектов при воздействии на них молнии // Электричество. - 1986. - №11. - С. 22-27.
 [10] Абрамов Н.Р., Кужекин И.П. К расчету нагрева стенок металлических объектов при воздействии на них молнии // Электричество. - 1990. - №5. - С. 56-59.
 [11] Baranov M.I., Bondina N.N., Neskorodov G.F. Numerical Calculation of Nonstationary Electromagnetic and Thermal Processes under Action of Lightning Channel on the Metal Objects. -9-th International Symposium on High Voltage Engineering. Graz, Austria, 1995, Paper №6806, Vol. 6, p. 6806-1 – 6806-4.
 [12] Баранов М.И. Одномерная электротепловая задача для металлической обшивки летательного аппарата при воздействии на нее молнии // Електротехніка і електромеханіка. - 2007. - №1. - С. 65-71.
 [13] Райзер Ю.П. Физика газового разряда. - М.: Наука, 1987. - 592 с.
 [14] Лыков А.В. Теория теплопроводности. - М.: Высшая школа, 1967. - 599 с.
 [15] Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. - М.: Наука, 1964. - 487 с.
 [16] Абрамов Н.Р. Исследование приэлектродных областей дуги, свободно горящей в воздухе // Известия вузов СССР. Энергетика. - 1985. - №9. - С. 45-47.
 [17] Кучерявая И.Н. Тепловой анализ процесса электроискровой обработки гранул // Технічна електродинаміка. - 2003. - №2. - С. 67-71.
 [18] Лозанский Э.Д., Фирсов О.Б. Теория искры. - М.: Атомиздат, 1975. - 272 с.
 [19] Баранов М.И. Расчет глубины проникновения температурного поля в массивный проводник с переменным током // Електротехніка і електромеханіка. - 2004. - №2. - С. 74-79.
 [20] Рыкалин Н.Н., Углов А.А., Зуев И.В., Какора А.Н. Лазерная и электронно-лазерная обработка материалов. Справочник. - М.: Машиностроение, 1985. - 496 с.
 [21] Межгосударственный ГОСТ 30585-98. Стойкость к воздействию грозовых разрядов. Технические требования и методы испытаний / Рук. разработки - В.И. Кравченко. - Киев: Госстандарт Украины, 1998. - 27 с.
 [22] Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля. - М.: Мир, 1972. - 391 с.
 [23] Кухлинг Х. Справочник по физике / Пер. с нем. под ред. Е.М. Лейкина. - М.: Мир, 1982. - 520 с.
 [24] Романенко И.Н. Импульсные дуги в газах. - Чебоксары: Чуваш. гос. ун-т, 1976. - 136 с.
 [25] Волков Е.А. Численные методы. Учебное пособие для ВУЗов. - М.: Наука, 1987. - 248 с.

Поступила 07.11.2006