

ОДНОМЕРНАЯ ЭЛЕКТРОТЕПЛОВАЯ ЗАДАЧА ДЛЯ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ОБШИВКИ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НА 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. (057) 707-68-41, факс (057) 707-61-33, e-mail: nipkimolnija@kpi.kharkov.ua

Приведені результати наближеного аналітичного розрахунку перевищення температури у зоні прив'язки сильноточного іскрового каналу блискавки на плоскій поверхні металевій обшивці літального апарату (ЛА). Показано, що імпульсна складова повного струму блискавки часової форми 2/50 мкс з амплітудою 200 кА викликає лише локальний опік зовнішньої поверхні алюмінієвої стінки обшивки ЛА, а його постійна складова амплітудою 200 А та тривалістю у 1000 мс може забезпечувати її наскрізне проплавлення.

Приведены результаты приближенного аналитического расчета превышения температуры в зоне привязки сильноточного искрового канала молнии на плоской поверхности металлической обшивки летательного аппарата (ЛА). Показано, что импульсная составляющая полного тока молнии временной формы 2/50 мкс с амплитудой 200 кА вызывает лишь локальный ожог наружной поверхности алюминиевой стенки обшивки ЛА, а его постоянная составляющая амплитудой 200 А и длительностью в 1000 мс может обеспечивать ее сквозное проплавление.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время во всем мире проблема обеспечения безопасности полетов в околоземном воздушном пространстве летательных аппаратов (ЛА) как гражданского, так и военного назначения (самолетов, вертолетов, ракетно-космической техники) приобрела исключительную актуальность и государственную важность. Известно немало случаев, когда прямой удар молнии (ПУМ) в ЛА приводил к тяжелым авариям с катастрофическими последствиями для авиационной (ракетной) техники, обслуживающего ее персонала и пассажиров не ее борту [1-3]. Среднестатистически каждый самолет один раз в год подвергается воздействию молнии [4]. Как известно, основными поражающими факторами молнии являются: во-первых, мощные импульсные электромагнитные поля от сильноточного канала молнии, вызывающие появление в бортовых электрических цепях ЛА больших электрических наводок (индуцированных напряжений и токов) [5]; во-вторых, большие токи и переносимые электрические заряды в канале длинного искрового разряда молнии, обуславливающие при ПУМ протекание в зоне привязки ее сильноточного канала на обшивке ЛА и зоне растекания по ней (обшивке) тока молнии интенсивных электротермических процессов [6, 7]; в-третьих, большие электродинамические усилия, действующие на металлическую (композиционную) обшивку ЛА в зоне привязки на ней сильноточного канала молнии [8]. Данные факторы в своей совокупности представляют серьезную угрозу для любого ЛА, оказавшегося в зоне действия такого глобального природного явления как молния.

Известные работы, посвященные приближенным расчетам теплового воздействия канала молнии на металлическую обшивку ЛА, содержат крайне громоздкие, трудноприменимые для выполнения быстрого экспертного анализа теплового режима ее стенки и просто неудобные в практическом употреблении аналитические выражения для температуры нагрева материала стенки [9, 10] или достаточно сложные нелинейные численные модели электротепловых процессов при ПУМ в стенке обшивки ЛА [11], воспользоваться которыми сможет не каждый технический спе-

циалист – пользователь. Решение практических задач по оценке последствий действия молнии на ЛА часто требует иметь достаточно простые математические модели, обеспечивающие достижение инженерной точности соответствующих расчетов (с погрешностью в пределах 10%), и технические средства контроля результатов реального или имитационного воздействия молнии на ЛА. Кроме того, результаты указанных выше исследований не дают прямых ответов на характер распределения температуры под наиболее электротермически нагруженной опорной зоной канала молнии в зависимости от временного интервала изменения полного тока молнии, а также на пути и особенности оперативного определения таких важнейших характеристик электротермической стойкости металлической (композиционной) обшивки к действию ПУМ как глубина проплавления h_{Π} и время сквозного проплавления t_{Π} ее стенки.

Целью данной статьи является разработка упрощенной математической модели электротермических процессов в эпицентре действия молнии на ЛА, предназначенной для приближенного аналитического расчета температуры нагрева стенки металлической обшивки ЛА при воздействии на нее ПУМ под опорной зоной сильноточного канала молнии как на относительно короткой нарастающей токовой части грозового разряда с максимальным значением импульсной составляющей полного тока молнии, так и на относительно длинной спадающей токовой части грозового разряда с минимальным значением постоянной составляющей полного тока молнии.

1. ПРИНЯТЫЕ ДОПУЩЕНИЯ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим в цилиндрической системе координат электротепловое воздействие сильноточного искрового канала 1 грозового разряда на металлическую обшивку 2 ЛА толщиной h , размещенную 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°C). Примем, что искровой канал молнии представляет собой сплошной прово-

дящий цилиндр радиусом r_0 , состоящий из низко-температурной плазмы [12]. В связи с тем, что в реальных условиях радиус кривизны металлической обшивки ЛА значительно превышает толщину h ее стенки, то поверхность контакта искрового канала молнии с наружной поверхностью обшивки можно считать близкой к плоской поверхности [9-11]. Считаем, что электротепловое действие сильноточного канала молнии на металлическую обшивку ЛА аналогично действию во времени t мгновенного плоского источника тепла, приложенного к наружной поверхности обшивки в плоской круговой зоне привязки канала искрового разряда радиусом r_0 . Неравномерностью распределения плотности электрического тока молнии i_M по поперечному сечению рассматриваемого канала разряда и соответственно неравномерностью плотности теплового потока в круговой зоне привязки искрового канала молнии радиусом r_0 , поступающего в металлическую обшивку ЛА, пренебрегаем. Учитывая быстропротекающий импульсный характер (практически мгновенный в течение не более 1 с) локального нагрева металлической обшивки ЛА за счет "джоулевого" тепла, влиянием теплоотдачи в окружающее обшивку воздушное пространство и теплопроводности материала стенки обшивки на протекающие в зоне привязки сильноточного канала молнии электротепловые процессы пренебрегаем.

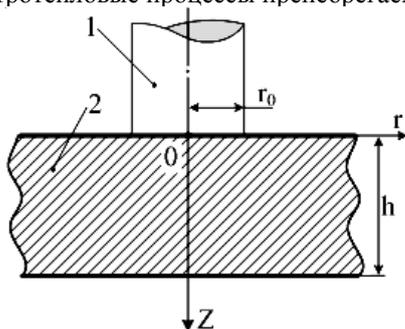


Рис. 1. Расчетная модель плоской стенки металлической обшивки ЛА при воздействии на нее ПУМ

Принимая во внимание приближенный характер выполняемого нами аналитического расчета теплового поля в стенке металлической обшивки ЛА, испытывающей действие ПУМ, изменениями коэффициента теплопроводности λ_0 (Дж/м·с·°С) и удельной объемной теплоемкости c_0 (Дж/м³·°С) материала обшивки, вызванными его импульсным нагревом практически в адиабатическом режиме, можно также пренебречь. Исследование импульсного нагрева материала рассматриваемой обшивки ЛА за счет кратковременного ввода в него теплового потока из сильноточного канала молнии ограничим температурой его (материала) испарения $T_{И}$. На данном этапе исследований в рамках предлагаемой упрощенной одномерной математической модели электротепловых процессов в обшивке ЛА рассмотрим результаты воздействия на плоскую стенку металлической обшивки ЛА лишь импульсной составляющей с временными параметрами 2/50 мкс (амплитуда – 200 кА) и постоянной составляющей длительностью в 1с (амплитуда – 200 А) полного тока молнии i_M [1, 3].

Требуется в приближенном виде с учетом принятых допущений получить простые аналитические соотношения, адекватно описывающие одномерное температурное поле в зоне привязки сильноточного канала молнии на плоской металлической обшивке ЛА.

2. ОСНОВНЫЕ РАСЧЕТНЫЕ СООТНОШЕНИЯ МОДЕЛИ

Расчет температурного поля стенки обшивки ЛА. На основании теории теплопроводности для пространственно-временного изменения превышения температуры $\theta(z,0,t)$ материала рассматриваемой плоской стенки металлической обшивки ЛА в зоне действия на нее поверхностного теплового потока по центру плазменного канала молнии ($r=0$) можно записать следующее приближенное выражение [13]:

$$\theta(z,0,t) = \frac{W_0}{2(\pi\lambda_0 c_0 t)^{1/2}} \cdot \exp(-z^2 c_0 / 4\lambda_0 t), \quad (1)$$

где $\theta(z,0,t) = \theta_t - \theta_0$; θ_t – текущая температура материала стенки обшивки ЛА; $\theta_0 = 20^\circ\text{C}$ – температура окружающего стенку обшивки ЛА воздуха; W_0 – удельная тепловая энергия (Дж/м²), выделяющаяся на наружной поверхности обшивки ЛА; z – продольная координата, направленная от очага теплового воздействия внутрь стенки обшивки ЛА.

В соответствии с теоретическими положениями электрофизики выражение для выделяющейся в зоне привязки сильноточного канала грозового разряда на поверхности плоской стенки обшивки ЛА удельной тепловой энергии W_0 принимает нижеследующий вид [3]:

$$W_0 = S_0^{-1} \int_0^{t_0} U_0 i_M dt, \quad (2)$$

где U_0 – приэлектродное падение электрического напряжения в опорной зоне сильноточного искрового разряда молнии; $S_0 = \pi \cdot r_0^2$ – площадь опорной зоны плазменного канала молнии; t_0 – длительность протекания импульсной (постоянной) составляющей полного тока i_M молнии.

Из теории искры известно, что величина U_0 представляет собой разность электрических потенциалов на границе раздела "плазменный канал искры – 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, 14].

Тогда выражение (2) для удельной тепловой энергии W_0 можно переписать в более удобном для последующего анализа виде:

$$W_0 = 10\pi^{-1} \cdot r_0^{-2} \cdot Q_0, \quad (3)$$

где $Q_0 = \int_0^{t_0} i_M dt$ – количество электричества, протекающее через опорную зону плазменного канала молнии на наружной поверхности обшивки ЛА за время действия t_0 импульсной (постоянной) составляющей полного тока i_M молнии.

Важной характеристикой одномерного распределения температурного поля в исследуемой обшивке ЛА является понятие глубины проникновения Δ_T в ее стенку теплового потока [15], на которой превышение температуры $\theta(z,0,t)$ уменьшается в e раз. Из (1) можно легко получить приближенное выражение для глубины проникновения Δ_T в металлическую стенку обшивки ЛА поверхностного теплового потока от источника, равномерно распределенного под опорной зоной плазменного канала молнии:

$$\Delta_T = 2 \sqrt{\frac{\lambda_0 \cdot t_0}{c_0}}. \quad (4)$$

Полученное соотношение (4) хорошо согласуется с известными в электрофизике [15, 16] и лазерной (электронно-лазерной) технике [17] соответственно расчетными и эмпирическими формулами для вычисления величины Δ_T .

Воздействие на обшивку ЛА импульсной составляющей тока молнии. В этом случае для данной аperiodической составляющей полного тока i_M молнии, характеризующейся временной формой $2/50$ мкс и значением длительности $t_0=500$ мкс, имеем [2, 3]:

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

где $I_m=200$ кА – нормированная требованиями межгосударственного ГОСТ 30585-98 [18] амплитуда импульсной составляющей полного тока грозового разряда; $\alpha_1 \approx 0,76/\tau_n = 1,529 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$; $\alpha_2 \approx 2,37/\tau_\phi = 1,188 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$; $\tau_\phi = 2 \cdot 10^{-6} \text{ с}$ – длительность фронта импульсной составляющей полного тока молнии между уровнями 0,1-0,9 от его амплитуды; $\tau_n = 50 \cdot 10^{-6} \text{ с}$ – длительность импульсной составляющей полного 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 [2, 3].

Для определения максимального значения радиуса плазменного канала сильноточного искрового разряда на стадии протекания импульсной составляющей полного тока i_M молнии и соответственно радиуса r_0 (м) его плоской круглой опорной зоны на обшивке ЛА воспользуемся известной формулой Брагинского, которая при принятых допущениях имеет вид [2, 14]:

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

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

В результате после подстановки выражений (2)-(6) в (1) для превышения температуры $\theta(z,0,t)$ материала стенки металлической обшивки ЛА вдоль продольной оси OZ плазменного канала грозового разряда на стадии воздействия импульсной составляющей полного тока i_M молнии за время ее длительности t_0 в безразмерном виде получаем:

$$\theta^*(z^*) = \frac{103,82 c_0^{1/2} \beta_0 Q_0}{t_m I_m^{2/3} (\lambda_0 t_0)^{1/2}} \cdot \exp[-(z^*)^2], \quad (7)$$

где $\theta^*(z^*) = \theta(z^*)/\theta_b$; $\theta(z^*) = \theta(z^*, 0, t_0)$; $\theta_b = (c_0 \beta_0)^{-1}$ – базисная температура (для алюминия $\theta_b=173^\circ\text{C}$ [6, 19]); $z^* = z/\Delta_T$; β_0 – тепловой коэффициент удельной электропроводности ($\text{м}^3/\text{Дж}$) материала металлической обшивки ЛА [19].

На рис. 2 приведена безразмерная графическая зависимость $\theta^*(z^*)$, построенная по (7) в случае воздействия молнии на алюминиевую обшивку ЛА при следующих исходных расчетных данных [3, 19]: $I_m=200$ кА; $t_m=3,71$ мкс; $t_0=500$ мкс; $Q_0=13,84$ Кл; $c_0=2,7 \cdot 10^6 \text{ Дж}/\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C}$; $\beta_0=2,14 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3/\text{Дж}$; $\lambda_0=240 \text{ Дж}/\text{м} \cdot \text{с} \cdot ^\circ\text{C}$; $r_0=10,48$ мм; $h=10$ мм. Из данных рис. 2 видно, что за время действия на алюминиевую стенку обшивки ЛА импульсной составляющей полного тока i_M молнии с принятыми нами АВП максимальное значение превышения температуры $\theta(z^*, 0, t_0)$ ее материала в эпицентре электротермического воздействия ($z^*=0$; $r=0$) составляет примерно всего $\theta(0,0,t_0)=1,15 \theta_b=199^\circ\text{C}$. Как известно, такого превышения температуры за время электротеплового воздействия $t_0=500$ мкс под опорной зоной плазменного канала молнии недостаточно для расплавления даже поверхностного слоя алюминиевой стенки обшивки ЛА, температура плавления T_{II} которой равна $T_{II}=658^\circ\text{C}$ [16, 19]. В этом случае возможен лишь локальный ожог данного слоя, не приводящий к электрической эрозии поверхности и структурным изменениям в материале обшивки ЛА. При этом, однако, нам не следует упускать из виду того факта, что температура низкотемпературной плазмы канала длинного искрового разряда молнии составляет около $T_p = \theta_t(0,0,t) = 20 \cdot 10^3 \text{ }^\circ\text{C}$ [12, 14].

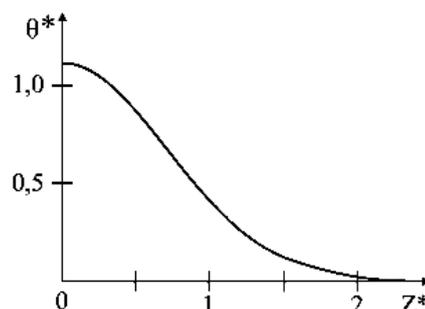


Рис. 2. Пространственное изменение безразмерного превышения температуры $\theta^*(z^*)$ материала алюминиевой обшивки ЛА на стадии воздействия на нее импульсной составляющей полного тока i_M молнии

В этой связи на стадии воздействия в течение времени $t_0=500$ мкс на стенку металлической обшивки ЛА импульсной составляющей полного тока молнии i_M в результате суммарного действия этих двух факторов на основании вытекающей из (1) зависимости вида $\theta_t(z,0,t) = \theta_t(0,0,t) \cdot \exp[-(z/\Delta_T)^2]$ все же

следует ожидать частичного оплавления зоны привязки радиусом r_0 канала грозового разряда на глубину z_0 , примерно равную $z_0 = 1,85 \cdot \Delta_T$. Отметим, что для рассматриваемого случая согласно (4) расчетная глубина проникновения Δ_T в алюминиевую стенку обшивки ЛА теплового потока принимает численное значение, равное около $\Delta_T = 0,21$ мм, а z_0 соответственно $z_0 = 0,39$ мм. Данные значения Δ_T и z_0 хорошо согласуются с известными опытными результатами, касающимися определения с использованием металлографических методов экспериментального исследования глубины прогрева Δ_0 плоской стенки образца обшивки ЛА из алюминиевого сплава марки Д16Т, где температура ее материала была не ниже температуры его отжига (закалки) $\theta_t = 500^\circ\text{C}$ [20], за счет действия теплового источника от сильноточного искрового разряда микросекундной длительности, формируемого в воздухе с помощью высоковольтной испытательной электрофизической установки на рабочем напряжении отрицательной полярности в 100 кВ ($I_m = 100$ кА; $t_m = 4,375$ мкс; $t_0 = 100$ мкс; $h = 10$ мм; $\Delta_0 = 0,4$ мм) [7, 15].

Воздействие на обшивку ЛА постоянной составляющей тока молнии. Согласно экспериментальным данным, относящимся к особенностям протекания постоянной составляющей полного тока i_M молнии в воздушном разрядном промежутке с алюминиевым электродом (анодом), характеризующейся практически неизменной во времени t амплитудой $I_m = 200$ А и значением длительности $t_0 = 1000$ мс [1, 3], для рассматриваемого случая электротермического нагружения алюминиевой обшивки ЛА используем следующую эмпирическую зависимость максимального радиуса r_0 (м) канала искрового разряда от величины тока I_m (А) в нем [9]:

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

Подставив в (8) требуемое значение амплитуды длительной составляющей полного тока молнии $i_M = I_m = 200$ А, находим, что $r_0 = 1,55$ мм. Используя (3), для количества электричества Q_0 , поступившего при воздействии ПУМ в обшивку ЛА на стадии протекания этой длительной составляющей тока молнии, получаем значение, численно составляющее около $Q_0 = 200$ Кл.

Тогда с учетом выражений (1)-(3) и (8) аналогично (7) для пространственного изменения превышения температуры $\theta(z, 0, t)$ материала алюминиевой стенки обшивки ЛА вдоль оси плазменного канала грозового разряда на стадии воздействия на нее постоянной составляющей полного тока i_M молнии за время ее длительности t_0 в безразмерном виде получаем:

$$\theta^*(z^*) = \frac{74,21 \cdot 10^6 \cdot c_0^{1/2} \cdot \beta_0 Q_0}{I_m (\lambda_0 t_0)^{1/2}} \exp[-(z^*)^2]. \quad (9)$$

После подстановки в (9) заданных численных значений соответствующих коэффициентов и АВП длительной составляющей полного тока i_M молнии следует, что максимальное значение превышения

температуры $\theta(z^*, 0, t_0)$ материала алюминиевой обшивки ЛА в эпицентре электротермического воздействия ($z^* = 0$; $r = 0$) в конце протекания постоянного тока в канале грозового разряда окажется равным $\theta(0, 0, t_0) = 16,84 \theta_b = 2913,3^\circ\text{C}$. Такая поверхностная температура материала стенки под плоской круговой областью теплового излучения от плазмы канала искрового разряда вызывает локальное разрушение наружной поверхности стенки алюминиевой обшивки ЛА и соответствует усредненной плотности q_T поверхностного теплового потока от канала ($r_0 = 1,55$ мм) к исследуемой стенке ($h = 10$ мм), приблизительно равной $q_T = I_m \cdot U_0 / \pi r_0^2 = 2,65 \cdot 10^8$ Вт/м². Здесь уместно также отметить то, что для рассматриваемой стенки обшивки ЛА температура испарения материала составляет $T_{II} = 2447^\circ\text{C}$ [16, 20]. Что касается величины глубины проникновения Δ_T температурного поля в стенку, то тут она согласно формуле (4) принимает расчетное численное значение $\Delta_T = 18,85$ мм. Подставив в выражение (9) относительное значение координаты $z^* = h / \Delta_T = h^* = 0,53$, для превышения температуры на внутренней поверхности стенки ($z = h$) обшивки ЛА при прежних исходных данных находим, что $\theta(h^*, 0, t_0) = 12,71 \theta_b = 2198,6^\circ\text{C}$.

Характер изменения при этом превышения температуры $\theta(z^*, 0, t_0)$ по толщине алюминиевой стенки обшивки ЛА отражает построенная по расчетному соотношению (9) кривая, изображенная на рис. 3.

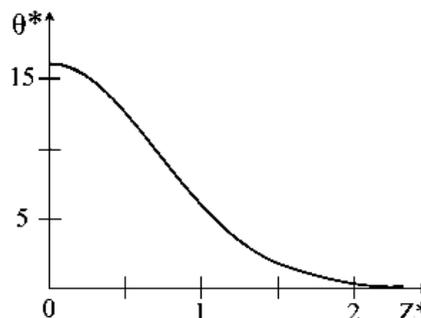


Рис. 3. Пространственное изменение безразмерного превышения температуры $\theta^*(z^*)$ материала алюминиевой обшивки ЛА на стадии воздействия на нее длительной постоянной составляющей полного тока i_M молнии

Из данных рис. 2 и 3 видно, что, во-первых, распространение тепла в исследуемой металлической стенке обшивки ЛА после воздействия на нее ПУМ происходит практически по кривым Гаусса [21], а, во-вторых, рассматриваемое электротепловое воздействие молнии на участке протекания длительной постоянной составляющей ее тока приводит к сквозному проплавлению алюминиевой стенки обшивки ЛА.

Расчет глубины проплавления стенки обшивки ЛА. Воспользовавшись формулой (9), для глубины проплавления h_{II} (м) стенки металлической обшивки ЛА, испытывающей действие ПУМ и нагреваемой при этом под опорной зоной канала молнии до температуры плавления T_{II} ее материала, находим:

$$h_{\Pi} = \sqrt{-4\lambda_0 c_0^{-1} t_0 \ln \left[\frac{I_m (T_{\Pi} - \theta_0) (\lambda_0 c_0 t_0)^{1/2}}{74,21 \cdot 10^6 Q_0} \right]}. \quad (10)$$

Из соотношения (10) после подстановки в него численных значений используемых нами ранее исходных данных для постоянной составляющей полного тока i_M молнии ($I_m=200$ А; $t_0=1000$ мс; $Q_0=200$ Кл; $r_0=1,55$ мм) и алюминиевой стенки исследуемой обшивки ЛА ($h=10$ мм; $T_{\Pi}=658^{\circ}\text{C}$; $\lambda_0=240$ Дж/м·с·°С; $c_0=2,7 \cdot 10^6$ Дж/м³·°С; $\theta_0=20^{\circ}\text{C}$) следует, что в рассматриваемом нами случае величина h_{Π} становится равной $h_{\Pi}=23,24$ мм. Поэтому не удивительно, что такая алюминиевая стенка, как было показано выше, на стадии ее нагрева длительной постоянной составляющей полного тока i_M молнии подвергается сквозному проплавлению.

Для оценки работоспособности формулы (10) и соответственно правомерности предложенной упрощенной модели нагрева плазменным каналом молнии металлической обшивки ЛА приведем иное выражение для h_{Π} , вытекающее из известного экспериментально подтвержденного и ранее опубликованного автором подхода по расчету кратеров электротеплового разрушения при ПУМ на поверхности подобной обшивки [3] и электрической эрозии металлических электродов высоковольтных силовых искровых коммутаторов [22], и выполним по ним сравнительные расчеты величины h_{Π} . С использованием результатов работ [3, 22] можно показать, что для рассматриваемой глубины проплавления h_{Π} (м) при принятых нами обозначениях будет также справедливо следующее соотношение:

$$h_{\Pi} = \frac{20Q_0}{\pi \cdot r_0^2 \cdot W_c}, \quad (11)$$

где W_c – удельная энергия сублимации материала металлической обшивки ЛА (для алюминия $W_c=2,29 \cdot 10^{10}$ Дж/м³ [3, 22, 23]).

Подставив в формулу (11) соответствующие численные значения входящих в нее параметров, получаем, что в нашем случае ($Q_0=200$ Кл; $r_0=1,55$ мм; $W_c=2,29 \cdot 10^{10}$ Дж/м³) величина h_{Π} оказывается примерно равной $h_{\Pi}=23,14$ мм, то есть практически такой же, как и рассчитанной по формуле (10). На наш взгляд, это может свидетельствовать о достоверности полученного в этой работе расчетного выражения (10), основанного на разработанной приближенной математической модели электротепловых процессов под опорной зоной силовых искровых грозового разряда, воздействующего на металлическую обшивку ЛА.

Расчет времени сквозного проплавления стенки обшивки ЛА. Время t_{Π} сквозного проплавления при ПУМ металлической стенки обшивки ЛА можно оценить из полученного нами аналитического выражения (9). Учитывая, что обычно $h^2 / \Delta_T^2 \ll 1$, то в (9) для экспоненциального множителя можно положить следующее приближение: $\exp(-h^2 / \Delta_T^2) \approx 1$. Тогда, из

соотношения (9) для времени t_{Π} (с) находим:

$$t_{\Pi} = \frac{(T_{\Pi} - \theta_0)^2 \cdot \lambda_0 \cdot c_0}{55,07 \cdot 10^{14}}. \quad (12)$$

Выполненная по выражению (12) расчетная оценка величины t_{Π} для рассматриваемой алюминиевой стенки обшивки ЛА показывает, что в нашем случае время t_{Π} ее сквозного проплавления численно составляет примерно $t_{\Pi}=47,88$ мс.

Расчет критических значений вводимой в стенку обшивки ЛА электротепловой энергии. Из анализа полученного выражения (1) следует, что существует критическое значение удельной тепловой энергии W_0 , вводимой из канала грозового искрового разряда в металлическую стенку обшивки ЛА, начиная с которого будет наблюдаться плавление и соответственно электроэрозионное разрушение ее материала. Это значение удельной тепловой энергии $W_0=W_{0k}$ можно будет определить из (1) при выполнении следующего условия: $z=h_{\Pi}=0$ [3, 24]. В результате несложных преобразований в расчетном соотношении (1) для величины W_{0k} (Дж/м²) согласно предложенной математической модели нагрева при ПУМ стенки металлической обшивки ЛА имеем:

$$W_{0k} = 3,545(T_{\Pi} - \theta_0)(\lambda_0 \cdot c_0 \cdot t_0)^{1/2}. \quad (13)$$

После подстановки в выражение (13) соответствующих известных и заданных условиями решаемой электротепловой задачи численных значений входящих в него теплофизических параметров ($T_{\Pi}=658^{\circ}\text{C}$; $\theta_0=20^{\circ}\text{C}$; $t_0=1000$ мс; $\lambda_0=240$ Дж/м·с·°С; $c_0=2,7 \cdot 10^6$ Дж/м³·°С) получаем, что для рассматриваемого нами случая воздействия ПУМ в алюминиевую стенку обшивки ЛА искомая величина W_{0k} принимает численное значение, примерно равное $W_{0k}=57,57 \cdot 10^6$ Дж/м².

Найденное согласно (13) критическое значение удельной тепловой энергии W_{0k} позволяет при известном радиусе r_0 опорной зоны искрового канала молнии на стадии протекания длительной постоянной составляющей ее тока i_M соответственно определить и критическое значение самой электротепловой энергии W_k , при превышении которого материал металлической стенки ЛА начинает плавиться и подвергаться электрической эрозии:

$$W_k = \pi r_0^2 \cdot W_{0k}. \quad (14)$$

Численная оценка по (14) величины W_k для исследуемого случая ($r_0=1,55$ мм) приводит нас к тому, что для алюминиевой стенки обшивки ЛА, испытывающей воздействие ПУМ, $W_k=0,434$ кДж.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана приближенная математическая модель одномерного температурного поля под опорной зоной радиусом r_0 силовых искровых грозового разряда, воздействующего в атмосферном воздухе на металлическую обшивку ЛА.

2. Показано, что импульсная составляющая пол-

ного тока молнии временной формы 2/50мкс, характеризующаяся амплитудой тока $I_m=200$ кА и длительностью его протекания $t_0=500$ мкс, осуществляет лишь локальный ожог наружной поверхности металлической стенки обшивки ЛА в опорной зоне искрового канала радиусом r_0 , не достаточный для расплавления и изменения агрегатного состояния материала обшивки. Одновременное же действие при этом в течение времени $t_0=500$ мкс на металлическую стенку обшивки ЛА высокой температуры плазменного канала молнии может приводить к частичному оплавлению зоны привязки грозового разряда радиусом r_0 на глубину z_0 не более двойной глубины проникновения Δ_T в исследуемую стенку температурного поля излучения от плазмы канала искрового разряда молнии, численно составляющей согласно предлагаемому подходу для алюминиевой стенки обшивки ЛА толщиной $h=10$ мм величину порядка $z_0 \approx 1,85 \cdot \Delta_T = 0,39$ мм.

3. Расчетным путем впервые установлено, что длительная постоянная составляющая тока молнии, характеризующаяся амплитудой тока $I_m=200$ А и длительностью его протекания $t_0=1000$ мс, в принятом приближении может вызывать сквозное проплавление исследуемой металлической стенки обшивки ЛА, испытывающего в полете или на земле внезапное прямое воздействие молнии.

4. На основании предложенной упрощенной модели электротепловых процессов, сопровождающих воздействие молнии на металлическую обшивку ЛА, получена формула (4) для приближенного расчета глубины проникновения Δ_T в ее стенку поверхностного теплового потока, излучаемого в опорной зоне радиусом r_0 сильноточным искровым каналом грозового разряда.

5. Получены аналитические выражения (10)-(14), определяющие при ПУМ глубину проплавления h_{II} и время сквозного проплавления t_{II} металлической обшивки ЛА, а также критические значения удельной W_{0k} и самой тепловой энергии W_k , вводимой из искрового плазменного канала молнии в металлическую стенку обшивки ЛА.

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// Электротехніка 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 сильноточного 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] Райзер Ю.П. Физика газового разряда.- М.: Наука, 1987.-592 с.
 [13] Математическое моделирование. Нелинейные дифференциальные уравнения математической физики/ Отв. ред. акад. А.А. Самарский. М.: Наука, 1987.-280 с.
 [14] Лозанский Э.Д., Фирсов О.Б. Теория искры.- М.: Атомиздат, 1975.-272 с.
 [15] Баранов М.И. Расчет глубины проникновения температурного поля в массивный проводник с переменным током// Электротехніка і електромеханіка.-2004.- №2.- С.74-79.
 [16] Кучерявая И.Н. Тепловой анализ процесса электроискровой обработки гранул// Технічна електродинаміка.-2003.- №2.- С. 67-71.
 [17] Рыкалин Н.Н., Углов А.А., Зуев И.В., Какора А.Н. Лазерная и электронно-лазерная обработка материала. Справочник.- М.: Машиностроение, 1985.-496 с.
 [18] 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.
 [19] Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля.- М.: Мир, 1972.-391с.
 [20] Кухлинг Х. Справочник по физике/ Пер. с нем. под ред. Е.М. Лейкина.- М.: Мир, 1982.-520 с.
 [21] Лыков А.В. Теория теплопроводности.- М.: Высшая школа, 1967.-599 с.
 [22] Баранов М.И. Приближенный расчет электрической эрозии металлических электродов высоковольтных сильноточных искровых коммутаторов// Технічна електродинаміка.-2004.- №5.- С.11-14.
 [23] Столович Н.Н. Электровзрывные преобразователи энергии/ Под ред. В.Н. Карношина.- Минск: Наука и техника, 1983.-115с.
 [24] Щерба А.А., Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Исследование электроэрозионных явлений при протекании импульсного тока между токопроводящими гранулами с учетом микроплазменного контактного промежутка// Технічна електродинаміка.-2002.- №4.- С.3-7.

Поступила 19.05.2006