

## Математическое моделирование электротепловых процессов в металлической обшивке летательного аппарата при воздействии на нее молнии

*Предложены приближенные математические модели двумерного температурного поля в опорной зоне канала грозового электрического разряда, действующего в атмосферном воздухе на плоскую стенку металлической обшивки летательного аппарата (ЛА). На их основе установлено, что при прямом ударе молнии в ЛА импульсная составляющая тока молнии временной формы 2/50 мкс с нормированной амплитудой 200 кА и длительностью 500 мкс из-за электротеплового действия вызывает локальное разрушение алюминиевой стенки обшивки ЛА на глубину до 0,4 мм, а длительная составляющая тока молнии с той же амплитудой и длительностью в 1000 мс может вызывать ее проплавление на глубину до 1,5 мм.*

*Запропоновано наближені математичні моделі двовимірної температурної поля в опорній зоні каналу грозового, електричного розряду, який діє у атмосферному повітрі на плоску стінку металевої обшивки літального апарату (ЛА). На їх основі встановлено, що при прямому ударі блискавки в ЛА імпульсна складова струму блискавки часової форми 2/50 мкс з нормованою амплітудою 200 кА і тривалістю 500 мкс через електротеплову дію викликає локальне руйнування алюмінієвої стінки обшивки ЛА на глибину до 0,4 мм, а тривала складова струму блискавки з тією ж амплітудою і тривалістю в 1000 мс може викликати її проплавлення на глибину до 1,5 мм.*

**Введение.** Проблема обеспечения электромагнитной безопасности полетов в околоземном воздушном пространстве летательных аппаратов (ЛА) различного типа и назначения как раньше, так и сейчас имеет во всем мире повышенную актуальность и большую практическую значимость. Мировая практика эксплуатации ЛА свидетельствует о том, что прямой удар молнии (ПУМ) в ЛА часто приводит к тяжелым авариям с катастрофическими последствиями для авиационной и ракетно-космической техники [5,8,15,24]. Одними из основных поражающих факторов молнии являются большие переносимые в канале искрового грозового разряда электрические заряды (в сотни кулон) и большие импульсные токи микро- и миллисекундного временного диапазонов (в десятки и сотни килоампер), обуславливающие при ПУМ протекание в зоне привязки сильноточного канала электрического разряда на металлической обшивке ЛА и зоне растекания по ней тока молнии интенсивных импульсных электротепловых процессов [4,7,25]. При комплексном подходе к молниезащите ЛА необходимо не забывать и о поражающих электромагнитных факторах молнии, таких как: мощные импульсные электромагнитные поля от искрового грозового разряда, вызывающие из-за своего проникновения через неоднородности металлической обшивки ЛА появление в зоне прокладки внутренних бортовых электрических цепей ЛА достаточно высоких уровней электрических наводок на них (индуцированных напряжений и токов) [11]; сверхвысокие импульсные электрические

напряжения (амплитудой свыше 1 МВ), негативно воздействующие при ПУМ на конструкционные металлические и изоляционные материалы элементов планера ЛА, что приводит к определенным нежелательным физико-химическим структурным изменениям в них (например, к потемнению стекол кабины пилотов самолетов [24]); большие импульсные электродинамические усилия (ударные нагрузки в десятки тысяч ньютонов) и соответственно механические напряжения, действующие при ПУМ на обшивку ЛА и стремящиеся нарушить ее герметичность [6]. Данные электромагнитные факторы в своей совокупности представляют серьезную угрозу для любого ЛА, оказавшегося в зоне прямого действия такого глобального природного электрофизического явления как молния.

Известные теоретические и экспериментальные исследования [2—4,10], посвященные приближенным оценкам теплового действия сильноточного канала молнии на токопроводящие элементы ЛА, содержат одномерные математические модели температурного поля в зоне прямого воздействия сильноточного канала молнии на плоскую бесконечно толстую стенку металлической обшивки ЛА и такие опытные данные, которые лишь в весьма грубом приближении отражают электротермические процессы, протекающие в обшивке ЛА при ПУМ. Тепловые модели указанных работ не позволяют: а) оценить размеры зоны разрушения обшивки (глубину и радиус проплавления ее стенки) при ПУМ; б) учесть влияние на распределение тем-

пературного поля в стенке металлической обшивки временного изменения радиуса канала молнии в процессе его воздействия на ЛА; в) выполнить сравнительный анализ влияния на электротепловое разрушения металлической стенки обшивки ЛА отдельных токовых компонент молнии; г) оценить влияние высоты полета ЛА на электротепловые процессы при ПУМ в металлической стенке его обшивки; д) учесть влияние длительности воздействия канала молнии на характер электротеплового повреждения стенки обшивки ЛА. Полученные в [1–3] опытные данные по воздействию в лабораторных условиях на образцы металлической обшивки ЛА имитированного тока молнии  $i_M$  базируются только на действии электрической дуги постоянного тока амплитудой от 200 до 800 А, свободно горящей над образцом в воздухе. Эти экспериментальные данные совершенно не учитывают и не отражают влияния на тепловое состояние обшивки ЛА реальных и нормированных амплитудно-временных параметров (АВП) токовых составляющих, импульсно протекающих в канале молнии [5,20,24]. До сих пор нерешенными остались дву- и трехмерные электротепловые задачи, связанные с анализом пространственного распределения температурного поля, прежде всего, в наиболее электротермически нагруженной области эпицентра воздействия канала молнии на обшивку ЛА. Не выяснены принципиально важные вопросы из области электротермической стойкости указанной обшивки к прямому действию молнии, которые связаны со сравнительной оценкой степени влияния импульсной и длительной составляющих полного тока молнии на характер проплавления металлической стенки планера ЛА. Подчеркнем здесь то, что эти компоненты полного тока молнии существенно отличаются друг от друга своими АВП [5,24]: нормированная импульсная токовая компонента молнии характеризуется амплитудой до 200 кА при длительности протекания до 500 мкс, а нормированная длительная компонента тока молнии — амплитудой не менее 200 А и длительностью до 1000 мс. До настоящего времени влиянием импульсной составляющей тока молнии на тепловые процессы в металлической обшивке ЛА необоснованно пренебрегают [1–3]. Поэтому актуальными остаются прикладные задачи, связанные с уточнением и последующим развитием математических моделей и методов расчета интенсивных электротепловых процессов в металлических элементах планера ЛА при ПУМ, испытывающих имитационное воздействие основных составляющих тока молнии с нормированными АВП.

Целью данной работы является дальнейшее развитие математических моделей электротепловых процессов в зоне действия тока молнии с нормированными АВП на металлическую обшивку ЛА, предназначенных для приближенного расчета двумерного температурного поля ее стенки в области опорной зоны канала грозового разряда как

на временном участке микросекундного диапазона с начальной токовой частью грозового разряда и сравнительно большим амплитудным значением импульсной составляющей тока молнии, так и на временном участке миллисекундного диапазона с завершающей токовой частью этого разряда и сравнительно малым амплитудным значением длительной составляющей тока молнии.

**Допущения и постановка задачи исследований.** Рассмотрим в цилиндрической системе координат электротепловое воздействие канала 1 грозового электрического разряда на размещенную в воздухе стенку 2 металлической обшивки ЛА конечной толщиной  $h$  (рис. 1). Пусть характеристики окружающей ЛА воздушной среды соответствуют ее нормальному состоянию (давление воздуха составляет  $1,013 \cdot 10^5$  Па, а его температура  $0^\circ\text{C}$ ). В первом приближении примем, что канал молнии представляет собой сплошной проводящий цилиндр радиусом  $r_0$ , состоящий из низкотемпературной плазмы [21]. В связи с тем, что на практике радиус кривизны обшивки ЛА значительно превышает толщину  $h$  ее стенки, то поверхность кругового контакта канала молнии с наружной поверхностью обшивки в первом приближении можно считать близкой к плоской [2,3,10,25]. Считаем, что импульсное электротепловое действие цилиндрического канала молнии на обшивку ЛА аналогично действию во времени  $t$  непрерывного поверхностного точечного источника тепла [10]. 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 ЛА в опорной круговой зоне привязки рассматриваемого канала искрового электрического разряда [13,19]. При этом неравномерностью распределения плотности электрического тока молнии  $i_M$  по поперечному сечению рассматриваемого канала разряда и соответственно радиальной неравномерностью плотности импульсного теплового потока в круговой опорной зоне канала молнии радиусом  $r_0$ , поступающего во временном интервале  $0 \leq t \leq t_0$  в обшивку ЛА, пренебрегаем. Обос-

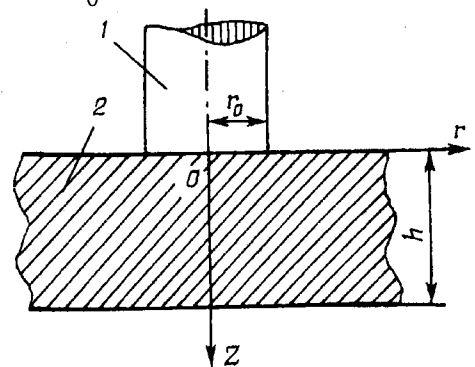


Рис. 1

нованием этому может служить то, что согласно известным экспериментальным исследованиям приэлектродных областей дугового электрического разряда в воздухе в них (этих областях) опорная зона канала разряда как бы "следит" за изменением тока [1]. В этой связи средняя плотность тока воздушного искрового разряда, равная отношению полного тока разряда в данный момент времени  $t$  к текущей площади  $S_0(t) = \pi r_0(t)$  круговой опорной зоны канала разряда на поверхности металлического электрода (обшивки ЛА) в этот же временной момент, практически не изменяется во времени  $t$ . Поэтому неизменной практически остается и средняя плотность поверхностного теплового потока, воздействующего со стороны плазменного канала разряда на металлический электрод [1]. Это обстоятельство для нашего случая позволяет при расчетной оценке действующей для  $z=0$  на стенку обшивки ЛА переменной во времени  $t$  плотности  $q(t)$  импульсного поверхностного теплового потока от плазменного канала молнии обоснованно использовать в динамике текущие значения импульса тока молнии  $i_M(t)$ , радиуса канала разряда  $r_0(t)$  и, соответственно, понятие усредненной по текущей площади  $S_0(t)$  опорной зоны канала молнии плотности поверхностного теплового потока  $q_0(t)$ , импульсно воздействующего на стенку обшивки ЛА в период времени  $0 \leq t \leq t_0$ . Учитывая быстропротекающий при ПУМ импульсный (в течение не более 1000 мс) характер локального нагрева стенки обшивки ЛА за счет выделяющегося в ней джоулева тепла, влиянием теплоотдачи в окружающее стенку обшивки воздушное пространство и теплопроводности материала обшивки ЛА, а значит и толщины ее стенки  $h$ , на протекающие в ней в зоне привязки канала молнии электротепловые процессы пренебрегаем. Считаем, что смещение опорной зоны канала молнии по поверхности обшивки ЛА отсутствует [7,11]. Принимая во внимание приближенный характер разрабатываемых математических моделей двумерного температурного поля в стенке обшивки ЛА, испытывающей действие ПУМ, изменениями коэффициента теплопроводности  $\lambda_0$  (Дж/м·с·°С), удельной объемной теплоемкости  $c_0$  (Дж/м<sup>3</sup>·°С) и теплового коэффициента удельной электропроводности  $\beta_0$  (мЗ/Дж) материала исследуемой обшивки, вызванными его импульсным и практически в адиабатическом режиме электротепловым нагревом, можно также пренебречь [14]. В рамках предлагаемых двумерных математических моделей электротепловых процессов в обшивке ЛА вначале рассмотрим результаты имитационного воздействия на плоскую стенку обшивки ЛА, нормированной относительно короткой импульсной составляющей тока молнии  $i_M$  с временными параметрами 2/50 мкс амплитудой 200 кА (длительность ее фронта между уровнями 0,1–0,9 равна  $\tau_{\phi} = 2$  мкс, а длительность импульса

тока на уровне 0,5 от амплитуды —  $\tau_{и} = 50$  мкс при его полной длительности  $t_0 = 500$  мкс), а затем, нормированной относительно длинной длительной составляющей тока молнии  $i_M$  амплитудой 200 А и длительностью в  $t_0 = 1000$  мс [8,20,24]. Таким образом, требуется в приближенном виде с учетом принятых допущений получить расчетные соотношения, описывающие двумерное температурное поле в зоне привязки канала молнии на плоской обшивке ЛА, и с помощью экспериментальных результатов лабораторных исследований по определению последствий имитационного воздействия импульсной и длительной токовых компонент грозового разряда на опытные образцы обшивки ЛА выполнить оценку работоспособности предлагаемых расчетных тепловых моделей.

**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 тела, для пространственно-временного изменения превышения температуры  $\theta(r, z, t)$  материала рассматриваемой плоской толстой стенки металлической обшивки ЛА конечной толщиной  $h$  в круговой зоне действия на нее во времени  $t$  поверхностного теплового потока плотностью  $q(t)$  от плазменного канала молнии можно записать следующее приближенное аналитическое выражение [13,17]:

$$\theta(r, z, t) = \frac{1}{(\pi \lambda_0 c_0)^{0,5}} \int_0^{t_0} r_0(\tau) q(\tau) F(r, z, t - \tau) d\tau, \quad (1)$$

где  $\theta(r, z, t) = \theta_1 - \theta_0$  — превышение температуры материала стенки обшивки ЛА;  $\theta_1$  — текущая температура материала стенки обшивки ЛА;  $\theta_0$  — температура окружающего стенку обшивки ЛА воздуха, равная в нашем случае  $\theta_0 = 0^\circ\text{C}$ ;  $r$  — радиальная координата, направленная от оси канала молнии вдоль стенки обшивки ЛА;  $z$  — продольная координата, направленная от очага теплового воздействия молнии внутрь стенки обшивки ЛА;  $q(\tau)$  — изменяющаяся во времени усредненная плотность воздействующего на стенку обшивки ЛА теплового потока, вызванного плазменным цилиндрическим каналом искрового разряда молнии ( $\text{Вт/м}^2$ );  $F(r, z, t - \tau) = \exp[-z^2 c_0 / 4 \lambda_0 (t - \tau)] \times (t - \tau)^{-0,5} \int_0^\infty \exp[-\lambda_0 (t - \tau) v^2 / c_0] J_0(vr) J_1(vr_0) dv$ ;  $\tau, v$  — вспомогательные переменные;  $r_0(\tau)$  — текущее значение радиуса канала молнии;  $t$  — текущее время;  $t_0$  — длительность протекания импульсной или длительной составляющих тока  $i_M$  молнии;  $J_0, J_1$  — соответственно функции Бесселя первого

рода нулевого и первого порядков.

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

$$q(\tau) = i_m(\tau) \cdot U_0 \left[ \pi r_0^2(\tau) \right]^{-1}, \quad (2)$$

где  $i_m(\tau)$  — ток молнии;  $U_0$  — приэлектродное падение электрического напряжения в опорной зоне на металлической обшивке ЛА канала искрового грозового разряда.

Из теории сильноточной искры следует, что величина электрического напряжения  $U_0$  представляет собой разность электрических потенциалов на границе раздела "плазменный канал искры — металлический электрод", которая для различных АВП тока искры (молнии) и токопроводящих материалов электродов (металлической обшивки ЛА) численно составляет значение, примерно равное  $U_0 = 10$  В [8,18,24]. Тогда выражение (2) для плотности теплового потока  $q(\tau)$ , являющейся одной из основных теплофизических характеристик, определяющих численное значение превышения температуры  $\theta(r, z, t)$  в исследуемой стенке металлической обшивки ЛА, принимает такой упрощенный вид

$$q(\tau) = 10 i_m(\tau) \cdot \left[ \pi r_0^2(\tau) \right]^{-1}. \quad (3)$$

Полезной с методической стороны характеристикой для качественного анализа распределения температурного поля в стенке исследуемой обшивки ЛА является глубина проникновения  $\Delta_T$  в нее теплового потока [9], на которой превышение температуры  $\theta(r, z, t)$  уменьшается в  $e$  раз. Из (1) аналогично [10] можно получить следующее приближенное расчетное выражение для глубины проникновения  $\Delta_T$  в металлическую стенку обшивки ЛА плоского теплового потока от источника неограниченной мощности, равномерно распределенного по всей наружной поверхности стенки обшивки ЛА и действующего на нее в течение времени  $t_0$ :

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

Соотношение (4) соответствует известным в электроискровой [9,10,17] и электронно-лазерной технике [23] расчетным формулам для оценочного вычисления величины  $\Delta_T$ .

**1. Воздействие на стенку обшивки ЛА импульсной составляющей тока молнии.** В данном случае для импульсной аperiодической составляющей полного тока  $i_m(\tau)$  молнии, характеризующейся

временной формой  $2/50$  мкс и значением полной длительности ее протекания в  $t_0 = 500$  мкс, имеем [5,8]

$$i_m(\tau) = \beta_m I_m \left[ \exp(-\alpha_1 \tau) - \exp(-\alpha_2 \tau) \right], \quad (5)$$

где  $I_m = 200$  кА — нормированная требованиями межгосударственного ГОСТ 30585-98 [20] амплитуда импульсной составляющей полного тока искрового грозового разряда (молнии);  $\alpha_1 \approx 0,76/\tau_{\text{и}} = 1,529 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$ ;  $\alpha_2 \approx 2,37/\tau_{\text{ф}} = 1,188 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$ ;  $\tau_{\text{и}} = 2 \cdot 10^{-6} \text{ с}$  — длительность фронта импульсной составляющей полного тока молнии между уровнями 0,1—0,9 от его амплитуды;  $\tau_{\text{и}} = 50 \div 10^{-6} \text{ с}$  — 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 [5,8].

Для определения при указанных допущениях на стадии протекания импульсной составляющей тока молнии  $i_m$  текущего значения радиуса  $r_0(\tau)$  канала молнии и, соответственно, радиуса  $r_{03}(\tau) = r_0(\tau)$  его круглой опорной зоны на плоской стенке обшивки ЛА воспользуемся известной формулой Брагинского для максимального радиуса сильноточного канала искрового разряда в воздухе [5,18] и принятой нами неизменностью во времени  $t$  усредненной плотности тока в канале грозового разряда. Тогда расчетное выражение для текущего радиуса  $r_0(\tau)$  канала молнии в атмосферном воздухе можно представить в следующем виде:

$$r_0(\tau) = r_{0m} \cdot \beta_m^{0,5} \cdot \left[ \exp(-\alpha_1 \tau) - \exp(-\alpha_2 \tau) \right]^{1/2}, \quad (6)$$

где  $r_{0m} = 0,093 (\rho_H/\rho_0)^{-1/6} \cdot (I_m)^{1/3} \cdot (t_m)^{1/2}$  — максимальное значение радиуса канала искрового разряда молнии (м);  $t_m = \ln(\alpha_2/\alpha_1)/(\alpha_2-\alpha_1)$  — время (с), соответствующее амплитуде  $I_m$  (А) импульсной составляющей полного тока молнии (при указанных выше коэффициентах ее формы  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  величина  $t_m$  численно составляет значение, равное примерно  $t_m = 3,71$  мкс, а  $r_0(t_m) = r_{0m}$ );  $\rho_H$  — плотность воздуха (кг/м<sup>3</sup>) на высоте  $H$  над поверхностью земли (уровнем моря);  $\rho_0$  — плотность воздуха при атмосферном давлении  $1,013 \cdot 10^5$  Па и температуре  $0^\circ\text{C}$ , равная  $1,293 \text{ кг/м}^3$  (в нашем случае  $\rho_H/\rho_0 = 1$ ) [16].

В результате для рассматриваемого случая после подстановки выражений (3)—(6) в (1) для превышения температуры  $\theta(r, z, t)$  материала стенки обшивки ЛА на стадии воздействия на нее в воздухе ( $\rho_H/\rho_0 = 1$ ) импульсной составляющей то-

ка молнии  $i_M(\tau)$  за время длительности  $t=t_0=500$  мкс ее протекания в безразмерном виде получаем

$$\theta^*(r^*, z^*, t_0^*) = \left[ \frac{10\beta_m^{0.5} I_m c_0 \beta_0}{\pi^{3/2} \lambda_0 r_{om}} \right] \int_0^{t_0^*} \left[ \exp(-\alpha_1^* \tau^*) - \exp(-\alpha_2^* \tau^*) \right]^{0.5} \cdot F(r^*, z^*, t_0^* - \tau^*) dt^*, \quad (7)$$

где

$$F(r^*, z^*, t_0^* - \tau^*) = \exp[-(z^*)^2 / 4(t_0^* - \tau^*)] (t_0^* - \tau^*)^{-0.5} \times \int_0^\infty \exp[-(t_0^* - \tau^*)(v^*)^2] J_0(v^* r^*) J_1(v^* r_0^*) dv^*;$$

$$\theta^*(r^*, z^*, t_0^*) = \theta(r^*, z^*, t_0^*) / \theta_b; \quad \theta_b = (c_0 \beta_0)^{-1} \text{ — базисная температура; } r^* = r / r_{om}; \quad z^* = z / r_{om}; \\ r_0^* = r_0(\tau) / r_{om}; \quad t_0^* = t_0 / t_b; \quad \tau^* = \tau / t_b; \quad \alpha_1^* = \alpha_1 \cdot t_b; \\ \alpha_2^* = \alpha_2 \cdot t_b; \quad t_b = c_0 r_{om}^2 / \lambda_0 \text{ — базисное время; } v^* = v \cdot r_{om}.$$

На рис. 2 приведена безразмерная графическая зависимость  $\theta^*(r^*, z^*, t_0^*)$ , построенная по (7) в случае воздействия импульсной составляющей тока молнии  $i_M(\tau)$  согласно (5) на алюминиевую стенку обшивки ЛА при следующих исходных расчетных данных для рассматриваемой электротепловой задачи [8,10,14]:  $I_m = 200$  кА;  $\alpha_1 = 1,529 \cdot 10^4$  с<sup>-1</sup>;  $\alpha_2 = 1,188 \cdot 10^6$  с<sup>-1</sup>;  $t_m = 3,71$  мкс;  $\beta_m = 1,072$ ;  $t_0 = 500$  мкс;  $r_{om} = 10,48$  мм;  $c_0 = 2,7 \cdot 10^6$  Дж/м<sup>3</sup>·°С;  $\beta_0 = 2,14 \cdot 10^{-9}$  м<sup>3</sup>/Дж;  $\theta_b = 173$  °С;  $\lambda_0 = 240$  Дж/м·с·°С;  $h = 10$  мм. На рис. 2 для кривой 1 —  $z^* = 0$ ; 2 —  $z^* = 0,02$ ; 3 —  $z^* = 0,03$ ; 4 —  $z^* = 0,04$ . Из данных рис. 2 видно, что за время действия  $t_0$  на алюминиевую стенку обшивки ЛА импульсной составляющей тока молнии  $i_M$  с принятыми АВП максимальное значение превышения температуры ее материала в эпицентре электротермического воздействия ( $z^* = 0$ ;  $r^* = 0$ ) составляет около  $\theta(0,0,t_0) = 39,3 \cdot \theta_b = 6799$  °С. Такого превышения температуры за время электротеплового воздействия  $t_0 = 500$  мкс под опорной зоной канала молнии

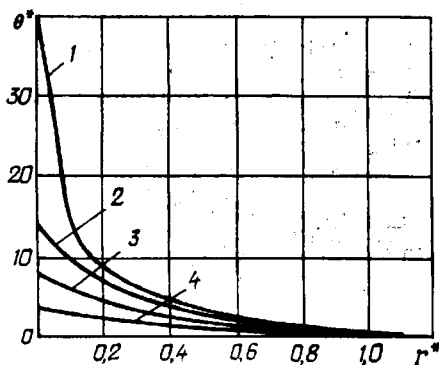


Рис. 2

вполне достаточно для расплавления, испарения и последующего локального разрушения поверхностного слоя алюминиевой стенки обшивки ЛА. Заметим, что температура плавления  $\theta_{п}$  для алюминиевой обшивки ЛА равна  $\theta_{п} = 658$  °С, а температура ее кипения составляет  $\theta_{к} = 2447$  °С [7,16]. Из-за принятого согласно (6) изменения во времени текущего радиуса канала молнии в этом случае поверхностная температура в опорной зоне канала с сильноточной импульсной токовой компонентой грозового разряда испытывает резкое радиальное затухание (кривая 1 на рис. 2). Такое радиальное изменение превышения поверхностной температуры  $\theta^*(r^*, z^*, t_0^*)$  алюминиевой стенки обшивки ЛА существенно отличается от известных экспериментальных результатов радиального распределения температуры в невозмущенной плазменной области сильноточного канала воздушного искрового разряда микросекундной длительности, удаленной от металлического электрода плоской формы [22].

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 и кривая 1 на рис. 3 для  $r = 0$ ). На рис. 3 приняты следующие обозначения: сплошная кривая 1 —  $\theta^*(0, z^*, t_0^*)$ , а пунктирная прямая 2 —  $\theta_{п}^* = \theta_{п} / \theta_b = 3,8$ . Причем, согласно сплошной кривой 1 и пунктирной прямой 2 на рис. 3, проплавление исследуемой металлической стенки обшивки ЛА за счет действия импульсной составляющей тока молнии  $i_M$  происходит на глубину  $h_{п}$  не более  $h \leq 0,4$  мм.

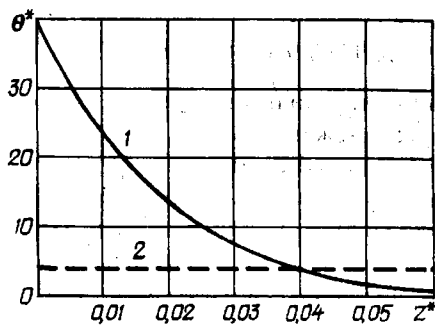


Рис. 3

Сравнение рассчитанных по формулам (1), (7) и ранее полученных опытных данных для превышения температуры  $\theta^*(r^*, z^*, t_0^*)$  применительно к воздействию на плоский толстостенный образец дуралюминовой обшивки ЛА ( $h = 10$  мм;  $c_0 = 2,7 \cdot 10^6$  Дж/м<sup>3</sup>·°С;  $\beta_0 = 2,14 \cdot 10^{-9}$  м<sup>3</sup>/Дж;  $\theta_b = 173$  °С;  $\lambda_0 = 240$  Дж/м·с·°С) импульсной составляющей тока сильноточного канала воздушного

искрового разряда ( $I_m = 100$  кА;  $t_m = 4,375$  мкс;  $t_0 = 500$  мкс;  $r_{0m} = 9,03$  мм), полученной с помощью разряда генератора импульсных токов (ГИТ) высоковольтной моделирующей установки [7], свидетельствует об их хорошем соответствии. Так, для приведенных выше исходных данных при  $z^* = 0,034$  ( $z = 0,31$  мм) расчетная по (7) температура  $\theta_i(0, z, t_0)$  стенки опытного дуралюминового образца обшивки ЛА в эпицентре электротеплового воздействия на нее канала импульсного искрового разряда составляет примерно  $\theta_i(0, z, t_0) = 475^\circ\text{C}$ , а экспериментально зафиксированная косвенным металлографическим путем — около  $\theta_i(0, z, t_0) = 500^\circ\text{C}$ . Интересно отметить, что при этом опытное определение температуры  $\theta_i(0, z, t_0)$  базировалось на результатах измерения согласно требованиям ГОСТ 9450-60 по глубине образца стенки дуралюминовой обшивки ЛА микротвердости, зависящей от температурного состояния ее материала [7]. Указанные выше результаты дают нам предварительное основание считать расчетные соотношения (1) и (7) вполне работоспособными и отражающими на стадии протекания импульсной составляющей тока молнии основные закономерности распределения двумерного температурного поля в области круговой зоны привязки ее канала на металлической обшивке ЛА (их прямая экспериментальная проверка с учетом полученных авторами опытных данных приведена ниже в отдельном подразделе). Отметим, что в выражениях (1) и (7) при численном интегрировании внутреннего несобственного интеграла  $\int_0^{\infty} F(x) dx$  была использована стандартная блок-схема вычисления интеграла от  $F(x)$  методом Симпсона [12], а вычисление наружного определенного интеграла вида  $\int_0^{t_0^*} f(\tau) d\tau$  выполнялось с использованием квадратурной формулы Гаусса-Лежандра [12].

Итак, в соответствии с полученными расчетными данными следует, что импульсная составляющая тока молнии  $i_m$  с принятыми АВП ( $I_m = 200$  кА;  $t_0 = 500$  мкс) может приводить к локальному проплавлению алюминиевой стенки обшивки ЛА на глубину  $h_{\text{п}} \leq 0,4$  мм ( $0 \leq z^* \leq 0,038$ ). Заметим, что при этом согласно (4) глубина проникновения  $\Delta_T$  в алюминиевую стенку обшивки ЛА теплового потока от сильноточного канала молнии принимает численное значение, примерно равное  $\Delta_T = 0,42$  мм, а в соответствии с (3) величина усредненной плотности  $q_0(t)$  поверхностного теплового потока от сильноточного плазменного канала молнии оказывается примерно равной  $q_0(t) = I_m \cdot U_0 / \pi r_{0m}^2 = 5,79 \cdot 10^9$  Вт/м<sup>2</sup>. Тем не менее, учитывая определяющий характер импульсной составляющей пол-

ного тока молнии  $i_m$  на развитие электромагнитной обстановки вне и внутри ЛА и на формирование при ПУМ картин ударных электродинамических нагрузок и механических напряжений в стенке обшивки ЛА [5,6,11], пренебрегать ее влиянием на электромагнитную безопасность полетов ЛА в электрически активной атмосфере все же не следует. В дальнейшем для упрощения тепловых расчетов рассмотрим независимое электротепловое действие на исследуемую стенку обшивки ЛА длительной слаботочной составляющей тока молнии  $i_m$ , не учитывающее результатов предыдущего теплового воздействия на эту же стенку импульсной сильноточной составляющей тока грозового разряда.

**2. Воздействие на стенку обшивки ЛА длительной составляющей тока молнии.** Экспериментальные данные по имитационному воздействию длительной составляющей тока молнии  $i_m$  в воздушной двухэлектродной разрядной системе на испытываемый плоский алюминиевый образец-электрод (анод), характеризующейся 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  $r_{0m}$  (м) канала воздушного электрического разряда от величины протекающего в нем тока  $I_m$  (А) [3]:

$$r_{0m} = 0,11 \cdot 10^{-3} (I_m)^{0,5} \approx 1,55 \text{ мм.} \quad (8)$$

После подстановки в выражение (7) заданных численных значений соответствующих коэффициентов и АВП длительной составляющей полного тока молнии  $i_m$  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 длительной составляющей тока в канале воздушного грозового разряда окажется примерно равным  $\theta(0,0,t_0) = 9,34\theta_b = 1616^\circ\text{C}$  (кривая 1 на рис. 4). На рис. 4 для кривой 1 —  $z^* = 0$ ; 2 —  $z^* = 0,2$ ; 3 —  $z^* = 0,5$ ; 4 —  $z^* = 1,0$ . Такая поверхностная температура материала стенки под плоской

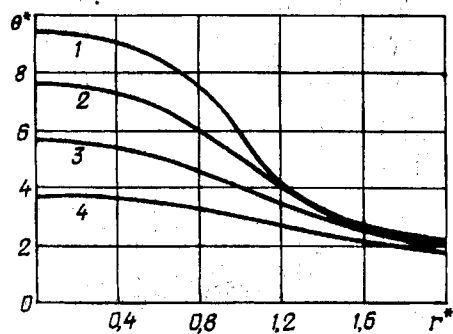


Рис. 4

круговой областью теплового излучения от плазмы канала разряда вызывает интенсивную электрическую эрозию, изменение агрегатного состояния материала стенки и соответственно локальное разрушение наружной поверхности стенки алюминиевой обшивки ЛА. При этом усредненная плотность  $q_0(t)$  поверхностного теплового потока от рассматриваемого канала воздушного электрического разряда ( $r_{0m} = 1,55$  мм) к исследуемой стенке обшивки ЛА оказывается приблизительно равной  $q_0(t) = I_m \cdot U_0 / \pi r_{0m}^2 = 2,65 \cdot 10^8$  Вт/м<sup>2</sup>.

Из данных рис. 4 видно, что на стадии воздействия в течение времени  $t_0 = 1$  с на алюминиевую обшивку ЛА длительной составляющей тока молнии амплитудой  $I_m = 200$  А с каналом постоянного радиуса  $r_{0m}$  в отличие от хода температурных кривых 1–4 на рис. 2 для импульсной составляющей тока молнии с изменяющимся во времени радиусом  $r_0(\tau)$  канала сильноточной искры наблюдается существенно меньшее радиальное изменение превышения ее температуры  $\theta^*(r^*, z^*, t_0^*)$  под опорной зоной канала разряда. В этом случае из-за неизменного во времени радиуса  $r_{0m}$  канала электрического разряда с длительной составляющей тока молнии  $i_m$  происходит менее интенсивное радиальное перераспределение или своего рода радиальное "размытие" температуры вдоль рассматриваемой круговой зоны стенки. При этом по сравнению со случаем воздействия импульсной составляющей тока молнии  $i_m$  за счет существенного возрастания времени токового воздействия  $t_0$  на радиальное распределение превышения температуры  $\theta^*(r^*, z^*, t_0^*)$  большее влияние начинает оказывать теплопроводность материала стенки обшивки ЛА (кривые 1–4 на рис. 4). Из-за этого температурное поле "выходит" за пределы опорной зоны канала разряда радиусом  $r_{0m}$  и "охватывает" своим действием больший круговой участок обшивки ЛА. Что касается расчетной величины глубины проникновения  $\Delta_T$  температурного поля в стенку, то она согласно формуле (4), принимает численное значение около  $\Delta_T = 19$  мм. Здесь необходимо указать то, что оцененные значения  $\Delta_T$  для рассматриваемых составляющих тока молнии  $i_m$  соответствуют идеализированному случаю, при котором на всей наружной поверхности обшивки ЛА (а не в локальной круговой области радиусом  $r_0(\tau)$  под каналом молнии с ограниченной мощностью теплового источника) в течение времени  $t_0$  их действия поддерживается постоянство некоторого превышения температуры  $\theta^*(r^*, 0, t_0^*)$  и не учитывается его изменения из-за временного изменения радиуса токового канала и импульсного отвода тепла из эпицентра воздействия ПУМ в направлении координат  $r$  и  $z$ . В этой связи указанные значения  $\Delta_T$  для решаемой задачи следует рассматривать только в виде качественных данных и использовать их целесообразно

лишь для тепловых полей, создаваемых токами микросекундной длительности. На это, кстати, прямо указывают приведенные данные расчетов для  $\theta^*(r^*, z^*, t_0^*)$  и  $\Delta_T$  применительно к импульсной компоненте тока молнии. Поэтому, несмотря на такое большое расчетное значение  $\Delta_T = 19$  мм, согласно сплошной кривой 1 для  $\theta^*(0, z^*, t_0^*)$  при  $r^* = 0$  и пунктирной прямой 2 для  $\theta_{\pi}^* = \theta_{\pi} / \theta_b = 3,8$  на рис. 5 в случае воздействия на алюминиевую стенку обшивки ЛА длительной составляющей тока молнии с принятыми АВП расчетная глубина ее проплавления  $h_{\pi}$  не превышает 1,5 мм ( $0 \leq z^* \leq 0,95$ ).

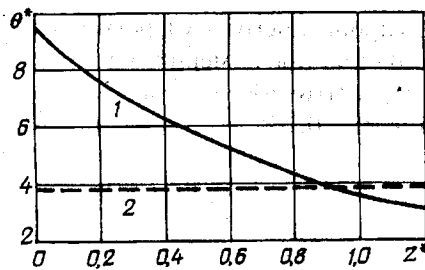


Рис. 5

**3. Экспериментальная проверка полученных результатов.** Вначале на действующем мощном ГИТ на номинальное напряжение  $\pm 50$  кВ (ГИТ-50) с разрядной цепью, собранной по классической схеме емкостного накопителя энергии (ЕНЭ) [7,15], были проведены эксперименты по имитационному воздействию импульсной компоненты тока молнии  $i_m$  на размещенные в атмосферном воздухе образцы обшивки ЛА толщиной  $h = 2$  мм и размерами в плане  $0,5 \times 0,5$  м<sup>2</sup>, изготовленные из алюминиевого сплава АМц. Теплофизические характеристики  $\lambda_0, \beta_0$  и  $c_0$  этого сплава имели следующие значения [16,23]:  $\lambda_0 = 180$  Дж/м·с·°С;  $\beta_0 = 1,95 \cdot 10^{-9}$  м<sup>3</sup>/Дж;  $c_0 = 2,97 \cdot 10^6$  Дж/м<sup>3</sup>·°С.

На рис. 6 показана осциллограмма полученной на ГИТ-50 (электрическая емкость ЕНЭ — 336

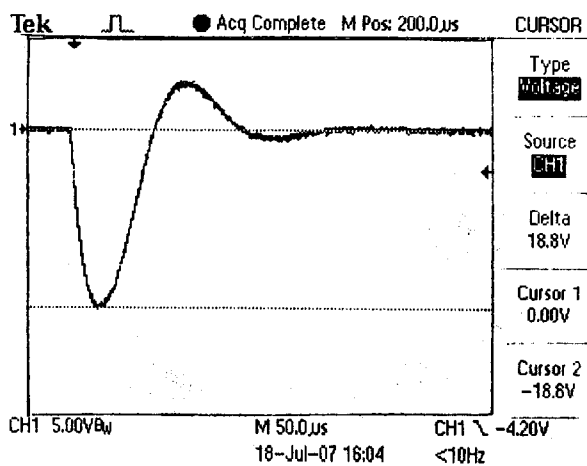


Рис. 6

мкФ; индуктивность — 2,05 мкГн; активное сопротивление — 0,061 Ом; номинальная запасаемая энергия — 420 кДж) импульсной составляющей имитированного тока молнии отрицательной полярности амплитудой  $I_m = 18,8 \cdot 11261 = 212$  кА (зарядное отрицательное напряжение ЕНЭ — 27 кВ; запасаемая в ЕНЭ энергия — 123 кДж; масштаб по вертикали — 5 В/дел; масштаб по горизонтали — 50 мкс/дел), интеграл действия тока которой имел нормированное значение  $J_{dA} = 2,09 \cdot 10^6$  А<sup>2</sup>·с [20, 24]. Измерение АВП воздействующей на исследуемые опытные образцы обшивки ЛА импульсной компоненты тока молнии было выполнено при помощи разработанного в НИПКИ "Молния" НТУ "ХПИ" и прошедшего государственную метрологическую аттестацию измерительного коаксиального шунта типа ШК-300, имеющего активное сопротивление  $R_{ш} = 0,185 \cdot 10^{-3}$  Ом и два согласованных выхода с коэффициентами преобразования 5642 А/В (выход №1) и 11261 А/В (выход №2), и цифрового осциллографа типа Tektronix TDS 1012.

На рис. 7 показан общий вид типичной зоны электротермического разрушения испытываемых образцов обшивки ЛА после воздействия на них указанной импульсной составляющей тока молнии. Обследование зоны повреждения примененных образцов показало, что при этом наибольшее значение глубины проплавления их стенки (образовавшейся "лунки") составило примерно  $h_{п} = 0,15$  мм, а радиуса оплавленной "лунки" — около 26 мм. В результате математического моделирования на основе предложенной тепловой модели указанного токового воздействия на образец обшивки ЛА из алюминиевого сплава АМц толщиной  $h = 2$  мм было установлено, что расчетная глубина наибольшего проплавления его стенки от действия используемой импульсной токовой компоненты молнии составляет около  $h_{п} = 0,1$  мм. Максимальное значение расчетного радиуса оплавленной "лунки" на стенке образца для данной составляющей тока молнии согласно (6) оказывается равным около 28 мм.

Затем при помощи ГИТ-5, построенного также

на базе ЕНЭ (электрическая емкость — 45,36 мФ; индуктивность — 11,43 мГн; активное сопротивление — 4,74 Ом; номинальная запасаемая энергия — 567 кДж), были осуществлены экспериментальные исследования имитационного воздействия длительной компоненты тока молнии на размещенные в атмосферном воздухе указанные выше опытные образцы обшивки ЛА из алюминиевого сплава АМц различной толщины  $h$  (2, 3, 4 и 6 мм).

На рис. 8 показана осциллограмма полученной на ГИТ-5 длительной составляющей имитированного аperiodического тока молнии ( $t_0 = 1000$  мс) отрицательной полярности амплитудой  $I_m = 0,15 \cdot 5642 = 846$  А (зарядное отрицательное напряжение ЕНЭ — 4,1 кВ; запасаемая в ЕНЭ энергия — 381 кДж; масштаб по вертикали — 50 мВ/дел; масштаб по горизонтали — 100 мс/дел), имеющей нормированное значение переносимого электрического заряда около  $q_C = 207$  Кл. При регистрации этой составляющей тока молнии на цифровом осциллографе типа Tektronix TDS 1012 был использован указанный выше измерительный коаксиальный шунт типа ШК-300 с выходом №1.

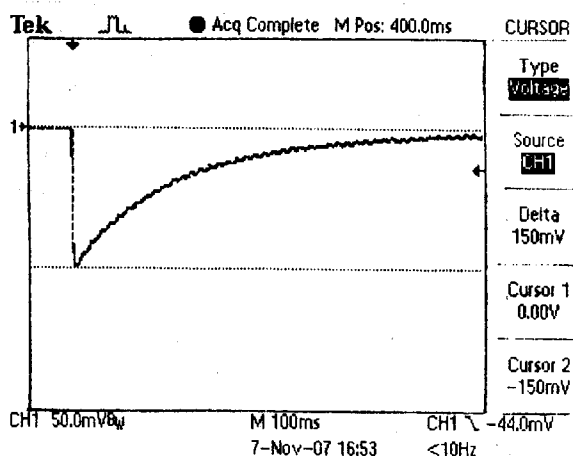


Рис. 8

На рис. 9 показан общий вид зоны сквозного прожога исследуемого плоского образца обшивки



Рис. 7

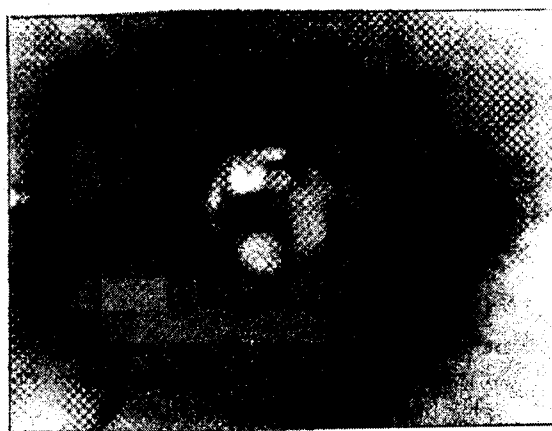


Рис. 9



ЛА толщиной  $h=2$  мм, образованной воздействием на него длительной компоненты имитированного тока молнии с указанными АВП. Согласно выполненным замерам радиус зоны проплавления на наружной поверхности стенки этого образца составил примерно  $r_{\text{пн}} = 3$  мм, а на внутренней — около  $r_{\text{пв}} = 1$  мм. Результаты моделирования при помощи соответствующей нашей тепловой модели такого электротеплового воздействия на исследуемый образец свидетельствуют о том, что для этого случая расчетные значения указанных радиусов проплавления в его стенке примерно составляют:  $r_{\text{пн}} = 2,6$  мм и  $r_{\text{пв}} = 0,9$  мм. Проведенные в дальнейшем эксперименты показали, что при действии имитированной с помощью ГИТ-5 длительной составляющей тока молнии с аналогичными АВП ( $I_m = 846$  А;  $t_0 = 1000$  мс) на испытываемый образец из алюминиевого сплава АМц с толщиной стенки  $h=6$  мм коническая "лунка" ее проплавления (с круглым основанием на наружной поверхности образца) характеризуется входным радиусом около  $r_{\text{пн}} = 2$  мм и глубиной не более  $h_{\text{п}} = 4$  мм (рис. 10). Итак, выполненные эксперименты подтверждают работоспособность предложенных тепловых моделей для оценки термического действия на металлическую обшивку ЛА импульсной и длительной составляющих тока молнии.

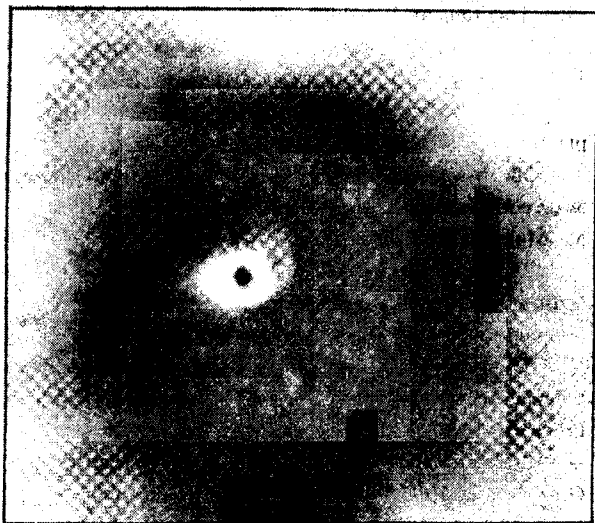


Рис. 10

**Выводы.** 1. Разработаны и апробированы приближенные математические модели двумерного температурного поля толстой стенки металлической обшивки ЛА толщиной  $h$  в области опорной круговой зоны плазменного канала молнии, воздействующего в атмосферном воздухе на ее наружную плоскую поверхность с изменяющимся во времени наружным радиусом  $r_0(\tau)$  на стадии протекания импульсной составляющей тока грозового разряда и с неизменным во времени наружным радиусом  $r_{0m}$  на стадии протекания длительной со-

ставляющей тока этого электрического разряда.

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 рассматриваемого канала молнии оплавление и разрушение толстой алюминиевой стенки обшивки ЛА на глубину не более  $h_{\text{п}} \leq 0,4$  мм. Несмотря на это, с учетом накопленного опыта эксплуатации ЛА в условиях грозовой деятельности пренебрегать влиянием импульсной составляющей тока молнии  $i_m$  с принятыми АВП на протекающие параллельно электротермическим процессам при ПУМ в металлической стенке обшивки ЛА интенсивные электромагнитные и электромеханические процессы и соответственно на показатели электромагнитной безопасности полетов ЛА нельзя.

3. Установлено, что длительная составляющая полного тока молнии  $i_m$ , характеризующаяся неизменной токовой амплитудой  $I_m = 200$  А и длительностью ее протекания  $t_0 = 1000$  мс, вызывает в круговой опорной зоне канала молнии радиусом  $r_{0m}$  и вблизи нее интенсивную электрическую эрозию толстой металлической стенки, агрегатные изменения в материале обшивки ЛА и может приводить к проплавлению алюминиевой стенки обшивки ЛА на глубину не более  $h_{\text{п}} \leq 1,5$  мм.

4. Выполненное сравнение результатов расчета по предложенным формулам (1) и (7) превышения температуры импульсного нагрева  $\theta(r, z, t_0)$  образцов обшивки ЛА из алюминиевого сплава АМц с толщиной стенки от 2 до 6 мм в случае воздействия на нее в атмосферном воздухе импульсной или длительной составляющих тока молнии с нормированными АВП и результатов, проведенных авторами с помощью мощных ГИТ, генерирующих указанные токовые компоненты молнии, соответствующих экспериментов, подтверждает работоспособность предложенных приближенных математических моделей двумерного температурного поля в локальной круговой зоне прямого термического действия канала молнии на металлическую обшивку ЛА.

5. Полученные результаты приближенного расчета двумерного температурного поля в плоской стенке металлической обшивки ЛА при ПУМ и выполненные эксперименты по определению термического действия основных компонент тока грозовых разрядов позволяют заключить, что при ПУМ с принятыми нормированными АВП рассмотренных составляющих полного тока молнии  $i_m$  для обеспечения ее электротермической стойкости и соответственно электромагнитной безопасности полетов ЛА в земной атмосфере в условиях протекания в ней мощных грозовых электрических разрядов минимальная толщина алюминиевой стенки обшивки планера ЛА должна примерно составлять не менее 4 мм. Данная прак-

тическая рекомендация не противоречит действующим в авиационной промышленности требованиям по комплексному выбору толщины металлической обшивки ЛА, учитывающему в настоящее время, прежде всего, ее механическую стойкость.

1. *Абрамов Н.Р.* Исследование приэлектродных областей дуги, свободно горящей в воздухе // Известия вузов СССР. Энергетика. — 1985. — №9. — С. 45—47.

2. *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.

3. *Абрамов Н.Р., Кужекин И.П.* К расчету нагрева стенок металлических объектов при воздействии на них молнии // Электричество. — 1990. — №5. — С. 56—59.

4. *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.

5. *Баранов М.И.* Моделирование электромагнитного эффекта при прямом ударе молнии в металлическую обшивку летательного аппарата // Техн. электродинамика. — 1999. — №1. — С. 16—21.

6. *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.

7. *Баранов М.И., Белозеров В.В., Кравченко В.И. и др.* Экспериментальные исследования электротеплового воздействия импульсного сильноточного искрового разряда на металлическую обшивку летательного аппарата // Техн. электродинамика. — 2003. — №1. — С. 3—7.

8. *Баранов М.И.* Расчет кратера электротеплового разрушения на металлической обшивке летательного аппарата при прямом ударе в нее молнии // Электротехника і електромеханіка. — 2003. — №4. — С. 101—103.

9. *Баранов М.И.* Расчет глубины проникновения температурного поля в массивный проводник с переменным током // Электротехника і електромеханіка. — 2004. — №2. — С. 74—79.

10. *Баранов М.И.* Одномерная электротепловая задача для

металлической обшивки летательного аппарата при воздействии на нее молнии // Электротехника і електромеханіка. — 2007. — №1. — С. 56—61.

11. *Борисов Р.К., Григорьев О.А., Ларионов В.П.* Методы испытания бортового оборудования летательных аппаратов на молниестойкость // Электричество. — 1993. — №7. — С. 21—27.

12. *Волков Е.А.* Численные методы. Учебное пособие для ВУЗов. — М.: Наука, 1987. — 248 с.

13. *Карслоу Г., Егер Д.* Теплопроводность твердых тел. — М.: Наука, 1964. — 487 с.

14. *Кнопфель Г.* Сверхсильные импульсные магнитные поля. — М.: Мир, 1972. — 391 с.

15. *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.

16. *Кухлинг Х.* Справочник по физике / Пер. с нем. под ред. Е.М. Лейкина. — М.: Мир, 1982. — 520 с.

17. *Кучерявая И.Н.* Тепловой анализ процесса электродисковой обработки гранул // Техн. электродинамика. — 2003. — №2. — С. 67—71.

18. *Лозанский Э.Д., Фирсов О.Б.* Теория искры. — М.: Атомиздат, 1975. — 272 с.

19. *Лыков А.В.* Теория теплопроводности. — М.: Высшая школа, 1967. — 599 с.

20. *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.

21. *Райзер Ю.П.* Физика газового разряда. — М.: Наука, 1987. — 592 с.

22. *Романенко И.Н.* Импульсные дуги в газах. — Чебоксары: Чуваш. госуд. ун-т, 1976. — 136 с.

23. *Рыкалин Н.Н., Углов А.А., Зуев И.В. и др.* Лазерная и электронно-лазерная обработка материалов. Справочник. — М.: Машиностроение, 1985. — 496 с.

24. *Юман М.А.* Естественная и искусственно инициированная молния и стандарты на молниезащиту // Труды американского ИИЭР. — 1988. — №12. — С. 5—26.

25. *Baranov M.I., Bondina N.N., Neskorođov 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. — №6806. — Vol. 6. — Pp. 6806-1—6806-4.

Надійшла 04.01.2007