

Электротермическая стойкость металлической обшивки летательного аппарата к прямому воздействию импульсного тока МОЛНИИ

БАРАНОВ М.И., КРАВЧЕНКО В.И.

Выполнена экспериментальная оценка электротермической стойкости листовых образцов обшивки летательного аппарата (ЛА) из алюминиевых сплавов толщиной 1–5 мм и размером в плане 500 500 мм² без защитных покрытий к прямому разделному и совместному воздействию на них импульсной А-компоненты и длительной С-компоненты тока имитированной в лабораторных условиях линейной молнии с нормированными международными документами амплитудно-временными параметрами. Опытным путем установлено, что электротермическая молниестойкость в атмосферном воздухе исследованных листовых образцов алюминиевой обшивки ЛА фактически определяется лишь одной длительной С-компонентой тока искусственной молнии, вызывающей локальное электротепловое проплавление и разрушение их плоской стенки в форме кругового конуса сходящей в нее вершиной на глубину до 4,3 мм.

Ключевые слова: летательный аппарат, прямое воздействие молнии, металлическая обшивка, термическая стойкость обшивки

Прямой удар линейной молнии в летательный аппарат (ЛА) может сопровождаться частичным или полным разрушением его конструктивных металлических и диэлектрических материалов и элементов (например, стенок электропроводящей обшивки и изоляционных обтекателей приемно-передающих антенн и радиолокаторов, токонесущих частей бортовой кабельно-проводниковой продукции и др.), приводящим к разгерметизации фюзеляжа, выходу из строя системы энергообеспечения и навигационных приборов, воспламенению паров горючего в топливных баках и катастрофическим последствиям для ЛА в целом [1, 2]. В этой связи решение вопросов молниестойкости основных элементов, устройств и бортовых систем ЛА к прямому (косвенному) воздействию на них грозовых разрядов приобретает первостепенное значение для обеспечения надежного функционирования и безопасного полета ЛА в условиях сложной электромагнитной обстановки в окружающем его воздушном пространстве.

Согласно требованиям действующих международных нормативно-технических документов [3–6] размещенные снаружи фюзеляжа ответственные

We describe an experimental study aimed at estimating the electrothermal resistance of 1–5 mm thick sheet samples with in-plan dimensions of 500 500 mm² made of aluminum alloys without protective coatings used as skin material for flying vehicles to direct separate and combined effect of the impulse A-component and continuous C-component of the current of linear lightning simulated under laboratory conditions and having the amplitude and timing parameters specified by the relevant international documents. It has been experimentally determined that the electrothermal lightning resistance of the studied sheet samples of aluminum skin material for flying vehicles in atmospheric air is in fact determined solely by the continuous C-component of artificial lightning current causing local electrothermal melting and destruction of their flat wall in the form of a circular cone the vertex of which penetrates into the wall to a depth of up to 4.3 mm.

Key words: flying vehicles, direct effect of lightning, metal skin, thermal resistance of skin

устройства и элементы ЛА гражданского и военного назначения должны экспериментально проверяться на прямое электротепловое действие на них соответствующих компонент тока искусственной молнии. Как известно, к таким токовым компонентам относятся [3–6]: импульсная *A*, промежуточная *B*, укороченная длительная *C**, длительная *C* и повторная импульсная *D* составляющие тока искусственной молнии, амплитудно-временные параметры (АВП) которых приведены в указанных нормативных документах и [7]. В этих документах указан также порядок токового нагружения испытываемых объектов авиационной и ракетно-космической техники при определении их электротермической стойкости к прямым воздействиям имитированных грозовых разрядов, включающий как раздельное, так и совместное действие на них тех или иных компонент тока линейной молнии с нормированными АВП.

Отметим, что под электротермической стойкостью ЛА, его элементов, устройств и бортовых систем к импульсному току молнии понимается способность рассматриваемых технических объектов противостоять действию температуры нагрева их

металлических, изоляционных и композиционных материалов от растекания по ним данного тока и тока электрических наводок до определенного ее уровня с сохранением своего работоспособного состояния [7]. Для практической реализации изложенных в [3–6] требований при испытаниях ЛА на молниестойкость в НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» на исследовательско-испытательном полигоне института в 2007 г. был создан мощный генератор тока искусственной молнии (ГТМ) с суммарной запасаемой электрической энергией до 1 МДж, содержащий в своем составе пять отдельных генераторов импульсных токов (ГИТ), предназначенных для имитации указанных пяти токовых компонент молнии [8–11]. Данные ГИТ, построенные по классической схеме на основе высоковольтных емкостных накопителей энергии [12], при своем разряде воспроизводят на общей электрической нагрузке (испытываемом объекте) требуемые по условиям проведения электротермических испытаний согласно [3–6] составляющие импульсного тока искусственной молнии, из которых импульсная *A*- и длительная *C*-компоненты являются определяющими по своему электротермическому воздействию на испытываемые объекты авиационной и ракетно-космической техники. Отметим, что в соответствии с [3–7] указанные компоненты тока искусственной молнии (как правило, отрицательной полярности) по модулю характеризуются следующими основными нормированными АВП:

а) *импульсная A-компонента тока молнии*: амплитуда тока $I_{mA} = (200 \pm 20)$ кА; интеграл действия $I_{dA} = (2 \pm 0,4) \cdot 10^6$ А²·с; время достижения амплитуды тока $t_{mA} \approx 50$ мкс; длительность протекания $t_{иA} \approx 500$ мкс;

б) *длительная C-компонента тока молнии*: амплитуда тока до $I_{mC} = 0,8$ кА; количество протекшего электрического заряда $Q_C = (200 \pm 40)$ Кл; длительность протекания $0,25$ с $\approx t_{иC} \approx 1$ с.

Постановка задачи опытного исследования поведения элементов металлической обшивки ЛА в условиях прямого действия на них тока искусственной молнии. В качестве исследуемого в атмосферном воздухе (давление $p_0 \approx 1,087 \cdot 10^5$ Па, а относительная влажность и температура равны примерно 75% и 20 °С) на молниестойкость металлического элемента ЛА выбираем плоский однородный участок его электропроводящей обшивки. Принимаем, что исследуемый в ГТМ металлический элемент обшивки ЛА представляет собой листовой образец без защитных покрытий и заклепок, который может быть выполнен из алюминиевого сплава различных марок (например АМг2М, А0М и АД5М) размером в плане 500 × 500 мм². Пусть толщина та-

кого плоского листового образца обшивки ЛА изменяется в пределах от 1 до 5 мм. Используем принципиальные электрические схемы разрядных цепей генераторов ГИТ-А и ГИТ-С (рис. 1), входящих в состав мощного ГТМ и предназначенных для формирования на общей электрической нагрузке (испытываемом листовом образце обшивки ЛА) либо отдельно импульсной *A*- и длительной *C*-компонент тока искусственной молнии, либо их требуемым образом разнесенной во времени совместной комбинации в соответствии с данными, взятыми из [3–6].

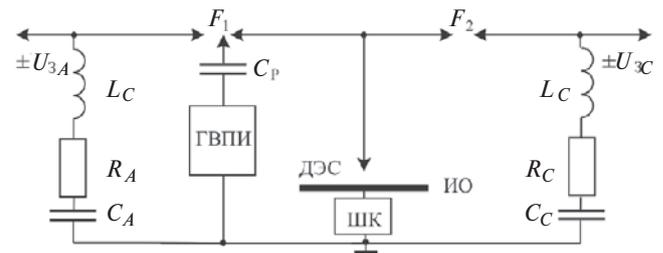


Рис. 1. Электрическая схема разрядных цепей генераторов ГИТ-А и ГИТ-С: ГВПИ — генератор высоковольтных поджигающих импульсов напряжения амплитудой до ± 100 кВ; F_1 , F_2 — трех- и двухэлектродные воздушные искровые коммутаторы генераторов ГИТ-А и ГИТ-С соответственно; C_p — разделительная емкость 180 пФ на напряжение амплитудой до ± 120 кВ для управления срабатывания искровых коммутаторов F_1 и F_2 ; ДЭС — двухэлектродная система ГТМ; ИО — испытываемый листовой образец обшивки ЛА; ШК — коаксиальный шунт ШК-300 для измерения импульсных токов амплитудой до ± 300 кА

Принимаем, что в проводимых экспериментах длина воздушного промежутка d_b между верхним *I* и нижним *З* массивными металлическими электродами двухэлектродной системы (ДЭС) рабочего стола ГТМ (рис. 2), в котором искусственно формируется сильноточный плазменный канал грозового разряда, составляет не менее 25 мм. Пусть радиус и длина электрически взрывающегося тонкого медного провода, вертикально размещенного над плоским массивным алюминиевым электродом *З* в ДЭС, являющимся одновременно и испытываемым листовым образцом обшивки ЛА, по требованиям [3–6] равны $r_0 = 0,1$ мм и $l_0 = 50$ мм. Считаем, что в ГИТ-А отрицательное зарядное напряжение U_{3A} для 111 шт. конденсаторов типа ИК 50-3 равно около 27 кВ, а в ГИТ-С отрицательное зарядное напряжение U_{3C} для 324 шт. конденсаторов типа ИМ2-5-140 — примерно 4,2 кВ. Согласно схеме на рис. 1 основные электрические параметры разрядных цепей ГТМ, используемых при рассматриваемых испытаниях листовых образцов алюминиевой обшивки ЛА, имеют следующие численные значения [8–11]: для генератора ГИТ-А — $C_A \approx 333$ мкФ; $L_A \approx 2,5$ мГн; $R_A \approx 0,057$ Ом; для ГИТ-С — $C_C \approx 45,36$ мФ; $L_C \approx 11,43$ мГн; $R_C \approx 4,74$ Ом.

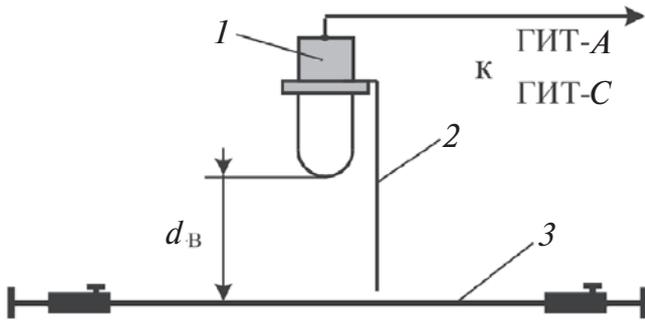


Рис. 2. Схема воздушной ДЭС, используемой в разрядных цепях генераторов ГИТ-А и ГИТ-С: 1 – верхний массивный стальной электрод ДЭС; 2 – тонкий прямолинейный электрически взрывающийся медный провод; 3 – опытный образец обшивки ЛА, являющийся нижним массивным электродом ДЭС

В соответствии со схемой рис. 1 полагаем, что электрический запуск высоковольтных воздушных искровых коммутаторов генератора ГИТ-А (трехэлектродного каскадного F_1 с зазорами 4 и 9 мм) и генератора ГИТ-С (двухэлектродного F_2 с зазором 3 мм) осуществляется при подаче на них через высоковольтную разделительную емкость $C_p = 180$ пФ от ГВПИ управляющего микросекундного импульса напряжения амплитудой до 100 кВ соответствующей полярности. Заметим, что для создания в указанных коммутаторах больших перенапряжений, повышающих надежность их срабатывания [12], данная полярность выбирается противоположной полярности зарядных напряжений U_{3A} и U_{3C} для генераторов ГИТ-А и ГИТ-С. Принимаем, что плазменный канал в выбранном воздушном промежутке ($d_в = 25$ мм) ДЭС инициируется над нижним алюминиевым электродом 3 (испытываемым листовым образцом обшивки ЛА) с помощью закрепленного на верхнем стальном электроде 1 и взрывающегося в воздухе тонкого без изоляции прямолинейного круглого медного провода 2 (см рис. 2), отделенного от нижнего алюминиевого электрода 3 воздушным зазором длиной не более 1 мм.

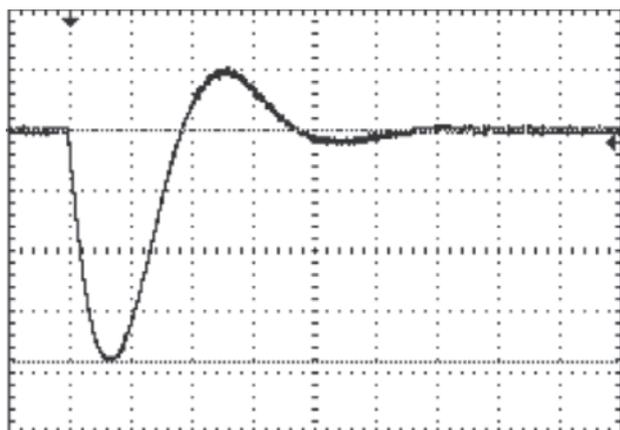
Измерение АВП формируемых в испытываемых листовых образцах обшивки ЛА компонент тока искусственной молнии выполняется с помощью метрологически поверенного измерительного коаксиального шунта ШК-300, снабженного специальным делителем напряжения с двумя коаксиальными выходами с различными значениями его коэффициента преобразования [8, 10]. Считаем, что при измерении АВП импульсной А-компоненты тока молнии коэффициент преобразования K_A для измерительного шунта ШК-300, имеющего собственное активное сопротивление 0,185 мОм и соединенного триаксиальной кабельной линией связи длиной 60 м с регистрирующей аппаратурой, равен около $11,26 \times 10^3$ А/В, а при фиксации АВП дли-

тельной С-компоненты тока молнии коэффициент преобразования K_C используемого шунта составляет примерно $56,42 \times 10^2$ А/В [8, 10]. По результатам опытного электротеплового воздействия в лабораторных условиях на испытываемые листовые образцы алюминиевой обшивки ЛА генерируемых в ГТМ импульсной А- и длительной С-компонент тока искусственной молнии с нормированными АВП, непосредственно получаемых в сильноточных разрядных цепях генераторов ГИТ-А и ГИТ-С и их воздушной ДЭС, требуется приблизительно определить основные характеристики зон разрушения (радиусы проплавления на наружной r_e и внутренней r_i плоских поверхностях образцов и глубины проплавления h_m стенок этих образцов) в исследуемых образцах и оценить по критерию $h_m < h$ [7] электротермическую стойкость опытных образцов алюминиевой обшивки ЛА к прямому действию на них рассматриваемых токовых компонент имитированного в ГТМ воздушного грозового разряда.

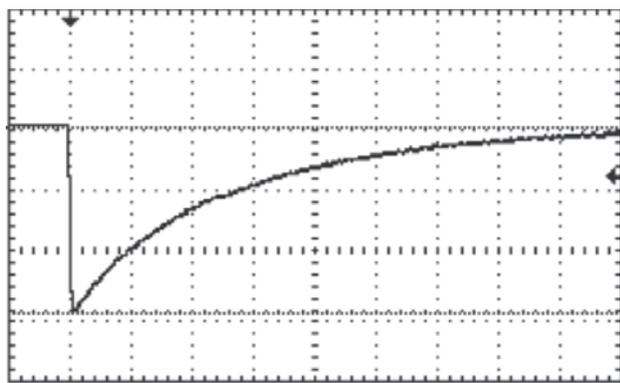
Результаты экспериментальных исследований электротермической стойкости опытных образцов алюминиевой обшивки ЛА к импульсному току искусственной молнии. Согласно рис. 1 при подаче от генератора ГВПИ на управляющий сферический электрод трехэлектродного воздушного коммутатора F_1 каскадного исполнения [8, 9] поджигающего импульса напряжения амплитудой 100 кВ положительной полярности предварительно заряженная до отрицательного напряжения $U_{3A} \approx -27$ кВ конденсаторная батарея генератора ГИТ-А разряжается на воздушную ДЭС с электрически взрывающейся медной проволокой и формирует в испытываемом листовом образце алюминиевой обшивки ЛА требуемую в соответствии с [3–6] импульсную А-компоненту тока молнии.

На рис. 3,а приведена типовая осциллограмма такого испытательного грозового импульса тока с нормированными АВП, полученная с помощью измерительного коаксиального шунта ШК-300 и цифрового запоминающего осциллографа типа Tektronix TDS 1012. Из приведенной на рис. 3,а осциллограммы импульсной А-компоненты тока искусственной молнии видно, что модуль ее первой амплитуды I_{mA} будет около 216,2 кА. Данной амплитуде I_{mA} импульсного тока молнии соответствует время $t_{mA} \approx 32$ мкс. Переход через ось абсцисс первой полуволны импульсной А-компоненты тока молнии происходит в момент времени примерно 90 мкс, а ее второй полуволны – при $T_A \approx 180$ мкс. Модуль амплитуды второй полуволны затухающего синусоидального тока $i_A(t)$ не превышает 56,3 кА, а третьей – 13,5 кА. Импульсная А-компонента тока молнии, генерируемая ГИТ-А в испытываемом листовом образце обшивки ЛА, характеризуется

сильным затуханием (логарифмический декремент колебаний D_A составляет не менее 2,73 при коэффициенте затухания в разрядной цепи генератора ГИТ-А $d_A \gg 15,17 \times 10^3 \text{ с}^{-1}$). Численное значение интеграла действия для импульсной А-компоненты имитированного тока молнии при ее длительности $t_{иА} \gg 500$ мкс оказывается примерно равным $J_{dА} \gg \int_0^{t_{иА}} i_A^2(t) dt \gg 2,03 \times 10^6 \text{ А}^2 \cdot \text{с}$.



а)



б)

Рис. 3. Типовая осциллограмма импульсной А-компоненты (а) и длительной С-компоненты (б) тока искусственной молнии с нормированными АВП в цепи ГТМ при разряде генератора ГИТ-А и генератора ГИТ-С соответственно на воздушную ДЭС с электрически взрывающейся тонкой медной провололочкой ($r_0 = 0,1$ мм; $l_0 = 50$ мм) и испытываемым листовым образцом обшивки ЛА из алюминиевого сплава АМг2М толщиной $h = 1$ мм: а — $U_{зА} \gg 27$ кВ; $I_{mA} \gg 216,2$ кА; $t_{mA} \gg 32$ мкс; $t_{иА} \gg 500$ мкс; $J_{dА} \gg 2,03 \times 10^6 \text{ А}^2 \cdot \text{с}$ (масштаб по вертикали — 56,3 кА/клетка; масштаб по горизонтали — 50 мкс/клетка); б — $U_{зС} \gg 4,2$ кВ; $I_{mС} \gg 0,869$ кА; $t_{mС} \gg 11$ мс; $t_{иС} \gg 1000$ мс; $Q_C \gg 216$ Кл (масштаб по вертикали — 282 А/клетка; масштаб по горизонтали — 100 мс/клетка)

На рис. 3,б представлена типовая осциллограмма длительной С-компоненты тока искусственной молнии, полученной в рассматриваемой согласно рис. 1 электрической схеме разряда генератора ГИТ-С с помощью измерительного коаксиального шунта ШК-300 и цифрового запоминающего осциллографа типа Tektronix TDS 1012. Из анализа рис. 3,б следует, что в этом случае амплитуда $I_{mС}$

$I_{mС}$ отрицательного аperiodического импульса длительной С-компоненты имитированного тока молнии $i_C(t)$ по модулю оказывается равной около 0,869 кА. Этой токовой амплитуде $I_{mС}$ соответствует время $t_{mС} \gg 11$ мс. Длительность протекания по испытываемому листовому образцу алюминиевой обшивки ЛА сформированной в разрядной цепи ГИТ-С длительной С-компоненты тока искусственной молнии оказывается равной $t_{иС} \gg 1000$ мс, а модуль переносимого ею заряда составляет примерно $Q_C \gg \int_0^{t_{иС}} i_C(t) dt \gg 216$ Кл.

В ходе проведенных электротермических испытаний опытных образцов алюминиевой обшивки ЛА на молниестойкость экспериментально зафиксированные АВП используемых компонент имитированного в разрядных цепях генераторов ГИТ-А и ГИТ-С тока молнии при неизменных значениях их зарядных напряжений $U_{зА} \gg 27$ кВ и $U_{зС} \gg 4,2$ кВ изменялись из-за варьирования толщины h листовых образцов в пределах от 1 до 5 мм не более чем на 2%.

Рассмотрим особенности проплавления листовых образцов алюминиевой обшивки ЛА от прямого действия на них импульсной А- и длительной С-компонент тока искусственной молнии, воспроизводимых в сильноточных цепях ГТМ. На рис. 4 приведен типовой внешний вид термического повреждения испытываемых листовых образцов алюминиевой обшивки ЛА при воздействии на них лишь импульсной А-компоненты тока молнии с нормированными АВП. В результате выполненных экспериментов было установлено, что при прямом воздействии в атмосферном воздухе плазменного канала от импульсной А-компоненты тока молнии на исследуемые образцы обшивки ЛА из алюминиевых сплавов на их наружных поверхностях, обращенных к ДЭС и взрывающимся медным проволочкам, возникает лунка частичного проплавления тарельчатой формы наружным радиусом $r_e \gg 30,5$ мм и глубиной около $h_m \gg 100$ мкм. Измерение геометрических размеров лунок проплавления в испытываемых листовых образцах выполнялось с помощью специального микрометра [13] и стандартного штангенциркуля. Следует отметить, что указанный радиус r_e лунки проплавления опытных образцов алюминиевой обшивки ЛА хорошо согласуется с расчетным значением максимального радиуса r_{mA} плазменного канала для импульсного тока $i_A(t)$, определяемым при принятых атмосферных условиях по формуле Брагинского $r_{mA} \gg 0,093(I_{mA})^{1/3}(t_{mA})^{1/2}$ [14] и равным при $I_{mA} \gg 216,2$ кА и $t_{mA} \gg 32$ мкс около 31,6 мм.

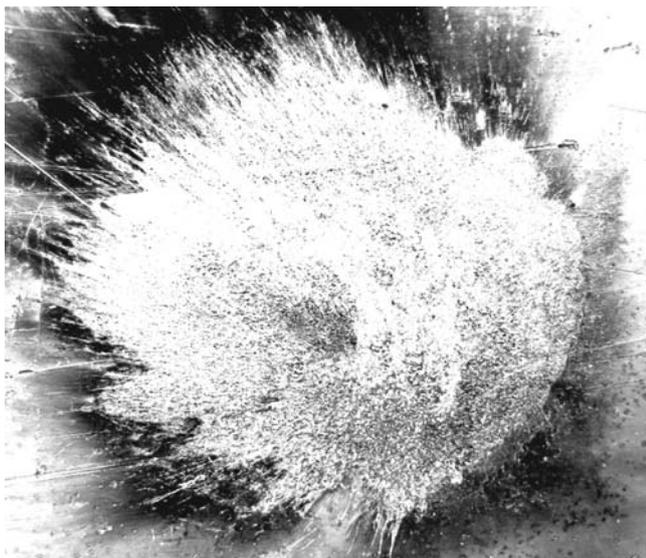
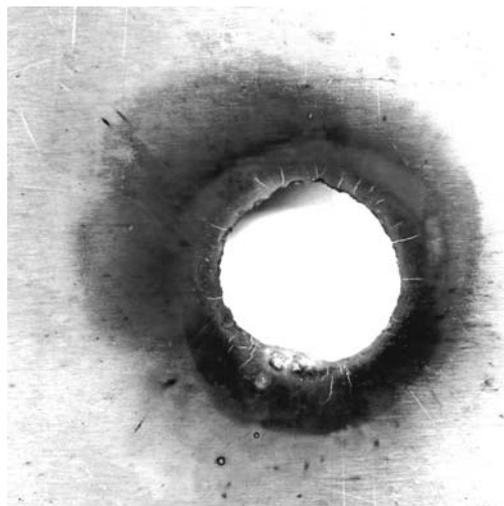


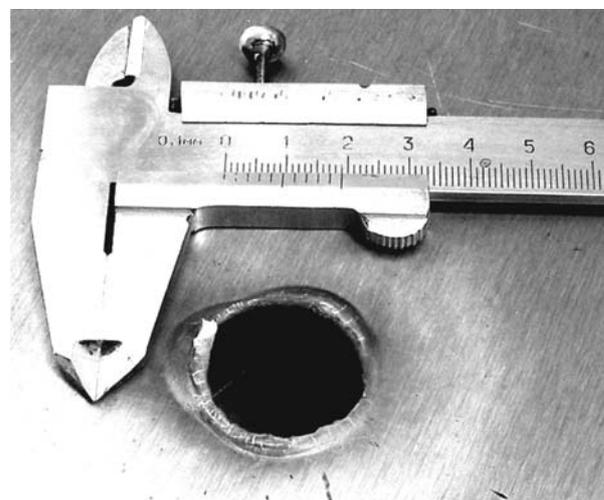
Рис. 4. Внешний типовой вид зоны поверхностного оплавления опытных листовых образцов обшивки ЛА из алюминиевых сплавов марок АМг2М, А0М и АД5М толщиной $h=1,5$ мм при прямом воздействии на них в разрядной цепи ГТМ с генератором ГИТ-А только импульсной А-компоненты тока искусственной молнии с нормированными АВП ($I_{mA} \gg 216,2$ кА; $t_{mA} \gg 32$ мкс; $t_{iA} \gg 500$ мкс; $J_{dA} \gg 2,03 \cdot 10^6$ А²·с)

На рис. 5 представлен общий вид зоны термического повреждения для листового образца из алюминиевого сплава марки АМг2М толщиной $h=1$ мм со стороны его наружной и внутренней поверхности от действия на него в воздухе плазменного канала только длительной С-компоненты тока искусственной молнии с нормированными АВП*. В рассматриваемом случае отдельного электротермического воздействия длительной С-компоненты тока молнии округлая лунка сквозного проплавления для исследуемого образца характеризуется наружным $r_e \gg 12,7$ мм и внутренним $r_i \gg 12$ мм радиусами.

При совместном же воздействии на указанный листовый образец обшивки ЛА из алюминиевого сплава марки АМг2М толщиной $h=1$ мм сначала импульсной А-компоненты, а затем сразу длительной С-компоненты тока имитированной в ГТМ молнии с нормированными АВП общие виды возникающей в нем зоны сквозного проплавления для наружной и внутренней поверхности образца представлены на рис. 6. При этом на наружной поверхности образца округлая лунка сквозного проплавления имеет радиус $r_e \gg 13$ мм, а на его внутренней поверхности — соответственно радиус $r_i \gg 12,3$ мм. Из анализа 5 и 6 следует, что результаты сквозного проплавления листового образца обшивки ЛА из алюминиевого сплава марки АМг2М толщиной $h=1$ мм от совместного действия в атмосферном



a)



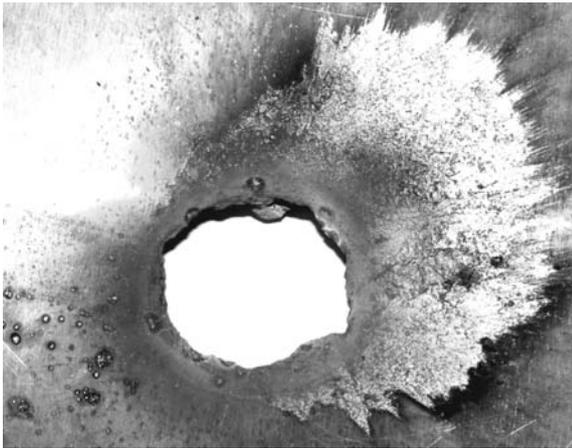
б)

Рис. 5. Внешний вид наружной (а) и внутренней (б) зоны сквозного проплавления опытного листового образца обшивки ЛА от прямого действия на него в разрядной цепи ГТМ с генератором ГИТ-С только длительной С-компоненты тока молнии с нормированными АВП

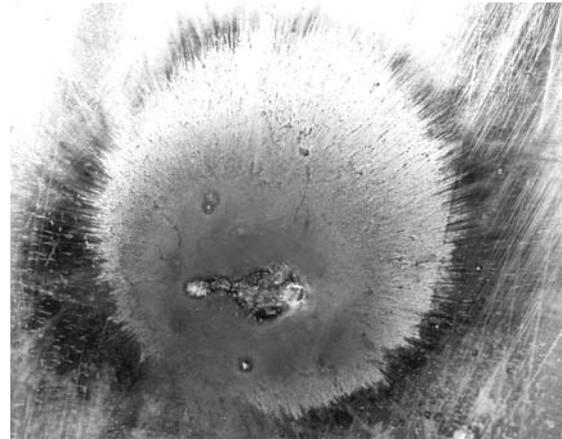
воздухе на него указанных А- и С-компонент тока искусственной молнии с нормированными АВП фактически не отличаются от результатов раздельного электротермического действия на его стенку импульсной А- и длительной С-компонент тока линейной молнии.

Результаты проплавления листового образца обшивки ЛА из алюминиевого сплава марки АМг2М толщиной $h=2$ мм для наружной и внутренней поверхности от совместного действия на него импульсной А- и длительной С-компонент тока искусственной молнии с принятыми АВП представлены на рис. 7. Путем обследования зоны поражения исследуемого образца испытательным током имитированной молнии было установлено, что в этом случае имеет место также сквозное проплавление образца. Округлая лунка конической формы сквозного проплавления в своем основании, распо-

* Здесь и в дальнейших опытах для длительной С-компоненты: $I_{mC} \gg 0,869$ кА; $t_{mC} \gg 11$ мс; $t_{iC} \gg 1000$ мс; $Q_C \gg 216$ Кл.



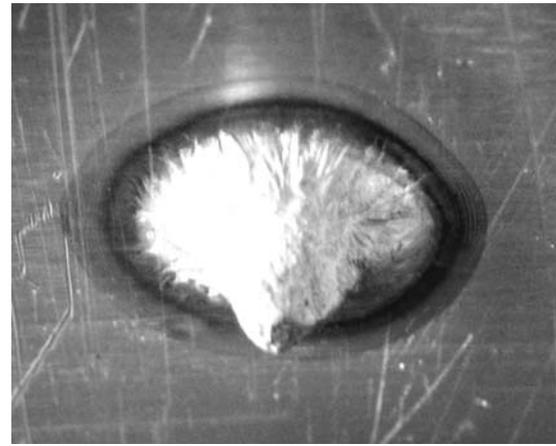
а)



а)



б)



б)

Рис. 6. Внешний вид наружной (а) и внутренней (б) зоны сквозного проплавления опытного листового образца обшивки ЛА толщиной $h = 1$ мм от совместного действия на него в разрядной цепи ГТМ с генераторами ГИТ-А и ГИТ-С импульсной А-компоненты ($I_{mA} \gg 216,2$ кА; $t_{mA} \gg 32$ мкс; $t_{иА} \gg 500$ мкс; $J_{dA} \gg 2,03 \times 10^6$ А²·с) и длительной С-компоненты тока искусственной молнии

Рис. 7. Внешний вид наружной (а) и внутренней (б) зоны сквозного проплавления опытного листового образца обшивки ЛА толщиной $h = 2$ мм от совместного действия на него в разрядной цепи ГТМ с генераторами ГИТ-А и ГИТ-С импульсной А-компоненты ($I_{mA} \gg 216,4$ кА; $t_{mA} \gg 32$ мкс; $t_{иС} \gg 500$ мкс; $J_{dA} \gg 2,03 \times 10^6$ А²·с) и длительной С-компоненты тока искусственной молнии

ложенном на наружной плоской поверхности образца, характеризуется наружным радиусом $r_e \gg 3,1$ мм (см. рис. 7,а). Радиус проплавления r_e при $I_{mC} \gg 869$ А хорошо согласуется с расчетным максимальным радиусом $r_{mC} \gg 3,2$ мм плазменного канала в воздухе для импульсного тока $i_C(t)$ длительной токовой С-компоненты имитированного грозового разряда, определяемым при принятых атмосферных условиях по приближенной формуле, представленной в [15]: $r_{mC} \gg 0,11 \times 10^{-3} (I_{mC})^{1/2}$.

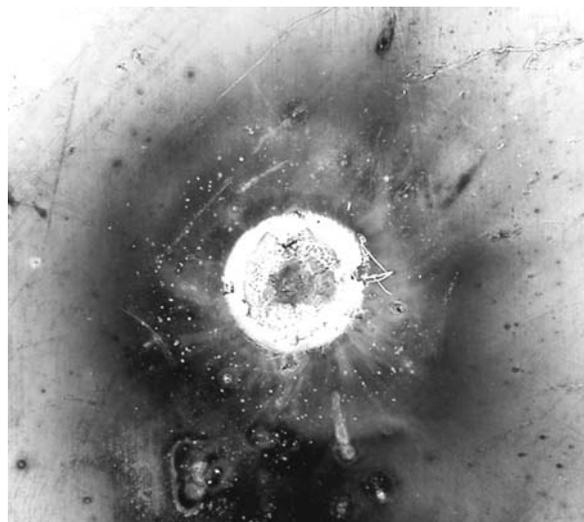
Срезанная и частично заплавленная вершина данной конической лунки, выходящей за пределы внутренней поверхности листового образца, имеет внутренний радиус зоны проплавления, равный $r_i \gg 1,2$ мм (см. рис. 7,б). Заметим, что на рис. 7,б рядом с конусом проплавления на внутренней поверхности опытного образца хорошо виден в полутоне округлый плоский пояс зоны подплавления его материала, равный по ширине $\sim 0,5$ мм. Вы-

полненные эксперименты показали, что для этого образца результаты электротермического воздействия на него импульсной А- и длительной С-компонент тока искусственной молнии с указанными АВП в режимах то ли раздельного, то ли совместного протекания по нему данных токовых компонент имитированной молнии по геометрическим характеристикам зон проплавления в его стенке практически не отличаются друг от друга.

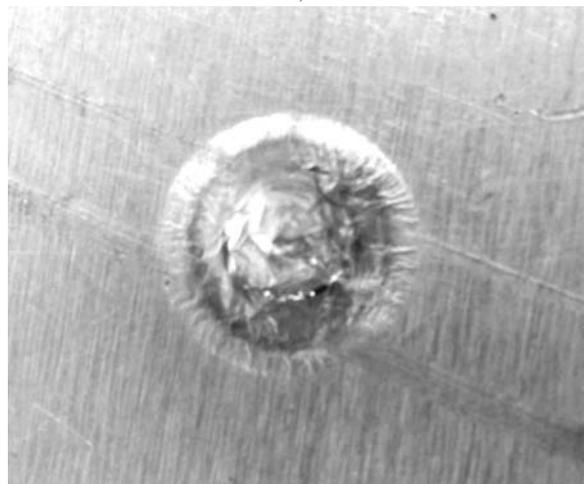
На рис. 8 приведены результаты воздействия на листовую образец обшивки ЛА из алюминиевого сплава марки А0М толщиной $h = 3$ мм только длительной С-компоненты тока искусственной молнии, касающиеся зон его проплавления от прямого действия ее плазменного канала разряда. Обработка результатов прямого электротермического воздействия на данный образец длительной С-компоненты имитированного тока молнии показала, что при этом округлая лунка сквозного проплавления в нем имеет коническую форму с наружным

$r_e \gg 2,7$ мм и внутренним $r_i \gg 0,6$ мм радиусами. На рис. 8 хорошо видна центральная светлая округлая зона перегрева и расплавления материала алюминиевого образца (с температурой свыше 658°C [16]) на наружной поверхности его стенки, соответствующая основанию кругового конуса проплавления диаметром до 5,4 мм. На внутренней поверхности данного листового образца ($h=3$ мм) вокруг вышедшего наружу с заплавленной вершиной конуса проплавления отчетливо просматривается округлый светлый пояс зоны подплавления материала образца, ширина которого составляет примерно 0,6 мм (см. рис. 8,б).

Данные рис. 9 демонстрируют результаты электротермического совместного действия на листовую образец толщиной $h=4$ мм из алюминиевого сплава марки А0М импульсной А- и длительной С-компонент тока искусственной молнии с нормированными АВП. Округлые зоны термического по-



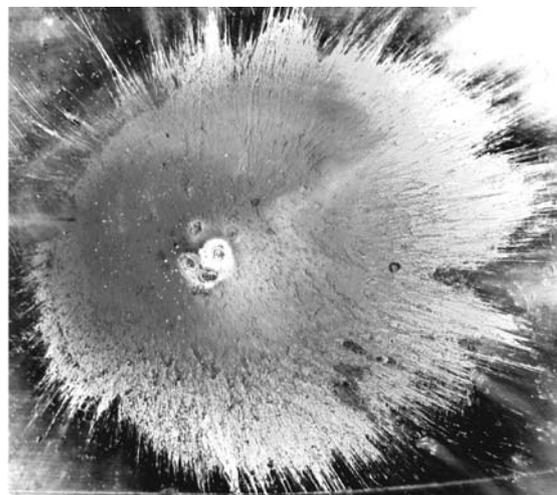
а)



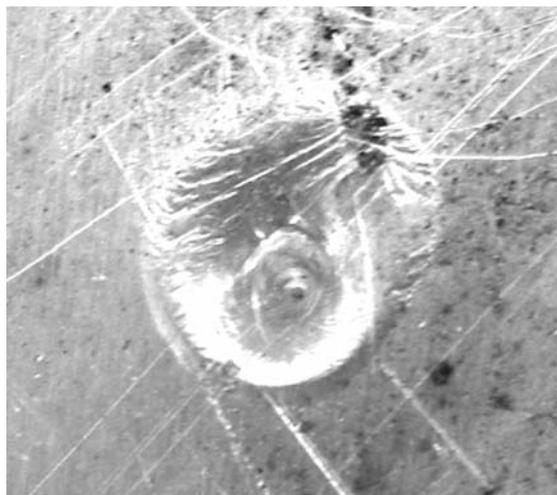
б)

Рис. 8. Внешний вид наружной (а) и внутренней (б) зоны сквозного проплавления опытного листового образца обшивки ЛА толщиной $h=3$ мм от прямого действия на него в разрядной цепи ГТМ с генератором ГИТ-С лишь длительной С-компоненты тока искусственной молнии

вреждения этого образца обшивки ЛА характеризуются сквозной конической лункой проплавления с наружным $r_e \gg 2,6$ мм (см. в центре очага поражения на рис. 9,а светлую зону его разрушения) и внутренним $r_i \gg 0,3$ мм радиусами (см. на рис. 9,б центральную зону разрушения образца). Необходимо отметить, что в ходе проведенных экспериментальных исследований была установлена следующая особенность поведения данного образца в условиях прямого удара в него рассматриваемых компонент тока имитированной молнии: результаты совместного действия в разрядных цепях ГТМ на исследуемый образец А- и С-компонент тока искусственной молнии незначительно отличаются от результатов раздельного электротермического воздействия на его стенку указанных компонент тока молнии с аналогичными нормированными АВП.



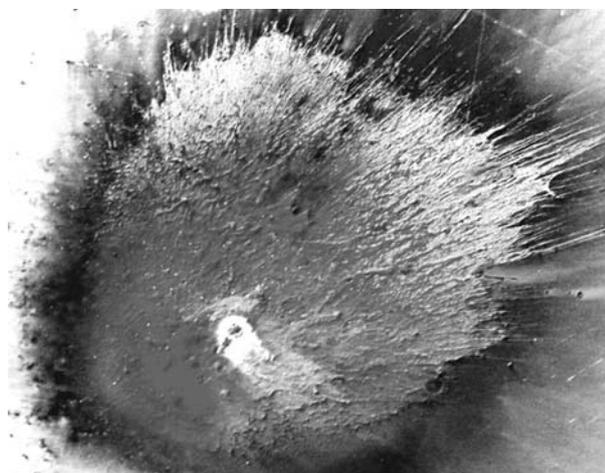
а)



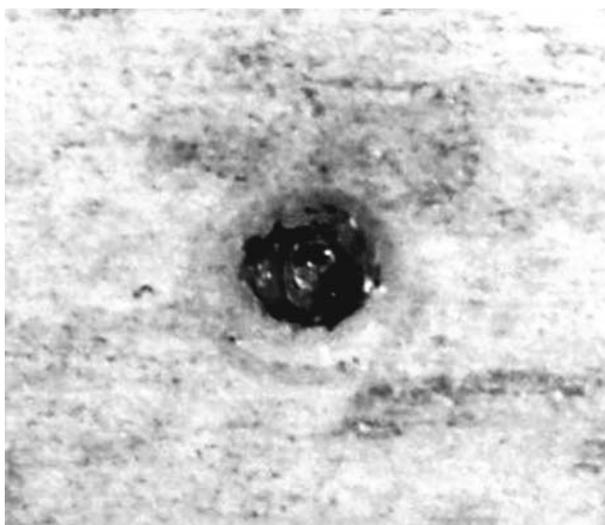
б)

Рис. 9. Внешний вид наружной (а) и внутренней (б) зоны сквозного проплавления опытного листового образца обшивки ЛА толщиной $h=4$ мм от совместного действия на него в разрядной цепи ГТМ с генераторами ГИТ-А и ГИТ-С импульсной А-компоненты ($I_{mA} \gg 218$ кА; $t_{mA} \gg 32$ мкс; $t_{iA} \gg 500$ мкс; $J_{dA} \gg 2,06 \times 10^6 \text{ A}^2 \cdot \text{с}$) и длительной С-компоненты тока искусственной молнии

На рис. 10 приведены опытные данные по проплавлению листового образца из алюминиевого сплава марки АД5М толщиной $h = 5$ мм в режиме совместного воздействия на него импульсной A - и длительной C -компонент тока искусственной молнии с нормированными АВП. В этом случае имеет место частичное проплавление стенки опытного образца обшивки ЛА, характеризующееся округлой конической лункой проплавления с наружным радиусом около $r_e \approx 2,5$ мм (см. центральную светлую часть очага поражения испытываемого образца на рис. 10, *a*) и глубиной проплавления примерно $h_m \approx 4,3$ мм. При этом в данном опытном образце из алюминиевого сплава марки АД5М вершина конуса проплавления практически упирается в плоскость внутренней поверхности его стенки, что приводит к визуально заметным на ней следам существ-



а)



б)

Рис. 10. Внешний вид наружной (*a*) и внутренней (*б*) зоны частичного проплавления опытного листового образца обшивки ЛА толщиной $h = 5$ мм от совместного действия на него в разрядной цепи ГТМ с генераторами ГИТ-А и ГИТ-С импульсной A -компоненты ($I_{mA} \approx 220$ кА; $t_{mA} \approx 32$ мкс; $t_{иА} \approx 500$ мкс; $J_{dA} \approx 2,1 \times 10^6$ А²·с) и длительной C -компоненты тока искусственной молнии

венного джоулева нагрева прилегающих к этой поверхности слоев материала исследуемого листового образца обшивки ЛА (см. рис. 10, *б*). Сквозного проплавления стенки исследуемого опытного образца указанными токовыми компонентами имитированной молнии не наблюдается. Раздельное воздействие на листовый образец из алюминиевого сплава марки АД5М толщиной $h = 5$ мм рассматриваемых основных компонент тока искусственной молнии не приводит к иным результатам проплавления этого опытного образца обшивки ЛА.

Выводы. 1. На основании проведенных экспериментов в атмосферном воздухе с помощью мощного генератора тока искусственной молнии [8–11], воспроизводящего в соответствии с действующими международными регламентирующими документами [3–6] его основные компоненты с нормированными АВП, установлено, что испытываемые листовые образцы обшивки ЛА из алюминиевых сплавов марок АМг2М и А0М толщиной h от 1 до 4 мм без защитных покрытий требованиям электротермической стойкости (по примененному здесь критерию $h_m < h$) к имитированному в лабораторных условиях импульсному току молнии с его нормированными импульсной A - и длительной C -компонентами не соответствуют. Опытные листовые образцы обшивки ЛА из алюминиевого сплава марки АД5М толщиной $h = 5$ мм без защитных покрытий данным требованиям электротермической молниестойкости удовлетворяют.

2. Экспериментально подтверждено теоретическое положение из [7, 15] о том, что в воздушной атмосфере электротермическая стойкость исследуемых листовых образцов алюминиевой обшивки ЛА толщиной $h = 1,5$ мм к многокомпонентному импульсному току имитированной согласно [3–6] линейной молнии определяется прямым действием на них только одной длительной C -компоненты тока искусственной молнии с нормированными АВП. Опытным путем показано, что данная токовая компонента имитированного воздушного разряда вызывает в указанных листовых образцах коническую лунку проплавления с круглым основанием в зоне привязки плазменного канала разряда на их наружной поверхности и глубиной h_m до 4,3 мм, тогда как импульсная A -компонента тока искусственной молнии с нормированными АВП приводит к появлению на наружной поверхности исследованных образцов алюминиевой обшивки ЛА тарельчатой лунки оплавления, по диаметру значительно большей (примерно в $r_{mA} / r_{mC} \approx 10$ раз) указанной конической лунки и глубиной h_m лишь до 100 мкм.

3. Полученные экспериментальные результаты по электротермической стойкости к основным

компонентам импульсного тока искусственной молнии указанных листовых образцов алюминиевой обшивки ЛА могут быть использованы специалистами при практическом решении проблем обеспечения молниестойкости металлической обшивки ЛА.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Абрамов Н.Р., Кужекин И.П., Ларионов В.П.** Характеристики проплавления стенок металлических объектов при воздействии на них молнии. — Электричество, 1986, № 11.
2. **Uman M.A.** Natural and artificially-initiated lightning and lightning test standards. — Proc. of the IEEE, 1988, vol. 76, № 12.
3. **SAE ARP 5412/ED-84 (США).** Нормативный документ «Рекомендуемая практика авиационно-космических работ. Идеализированные составляющие внешнего тока», 1985.
4. **SAE ARP 5416/ED-84 (США).** Нормативный документ «Рекомендуемая практика авиационно-космических работ. Условия воздействия молнии на летательные аппараты и соответствующие формы испытательных сигналов», 1997.
5. **КТР-ВВФ/ДО-160D/ED-14D.** Квалификационные требования «Условия эксплуатации и окружающей среды для бортового авиационного оборудования. Требования, нормы и методы испытаний» (Раздел 23.0. «Прямое воздействие молнии»).— М.: Изд-во госстандартов РФ, 2004.
6. **MIL-STD-464A.** Военный стандарт США «Электромагнитные и экологические эффекты воздействия молнии. Требования интерфейса и критерии проверки систем».— Изд-во Минобороны, 2002.
7. **Баранов М.И.** Избранные вопросы электрофизики: Монография. Т. 2, кн. 2: Теория электрофизических эффектов и задач.— Харьков: Изд-во «Точка», 2010.
8. **Баранов М.И., Колиушко Г.М., Кравченко В.И. и др.** Генератор тока искусственной молнии для натурных испытаний технических объектов. — Приборы и техника эксперимента, 2008, № 3.
9. **Баранов М.И., Колиушко Г.М., Кравченко В.И. и др.** Высокоточные высоковольтные воздушные разрядники генератора тока искусственной молнии. — Приборы и техника эксперимента, 2008, № 6.
10. **Баранов М.И., Колиушко Г.М., Кравченко В.И. и др.** Мощная высоковольтная электрофизическая установка для имитации полного тока молнии и ее применение в области молниезащиты технических объектов. — Электротехника і електромеханіка (Харьков), 2008, № 3.
11. **Баранов М.И., Колиушко Г.М., Кравченко В.И. и др.** Мощный импульсный генератор тока молнии: разработка и примеры применения. — Материалы междунар. науч. конф. «Физика импульсных разрядов в конденсированных средах», Николаев, 17–21 августа 2009 г. — КП «Миколаївська областна друкарня», 2009.
12. **Техника** больших импульсных токов и магнитных полей/Под ред. В.С. Комелькова.— М.: Атомиздат, 1970.
13. **Баранов М.И., Кравченко В.И., Носенко М.А.** Экспериментальные исследования электротермической стойкости металлических элементов летательного аппарата к прямому воздействию тока искусственной молнии. Часть 1: Стойкость алюминиевой обшивки. — Электротехніка і електромеханіка (Харьков), 2011, № 1.
14. **Лозанский Э.Д., Фирсов О.Б.** Теория искры.— М.: Атомиздат, 1975.
15. **Абрамов Н.Р., Кужекин И.П.** К расчету нагрева стенок металлических объектов при воздействии на них молнии. — Электричество, 1990, № 5.
16. **Нильсен Х., Хуфнагель В., Ганулис Г.** Алюминиевые сплавы (свойства, обработка, применение): Справочник/Пер. с нем.— М.: Металлургия, 1979.

[01.03.12]

А в т о р ы : Баранов Михаил Иванович окончил в 1972 г. инженерно-физический факультет Харьковского политехнического института (ХПИ) по специальности «Инженерная электрофизика». В 1999 г. в Национальном политехническом университете (НТУ) «ХПИ» защитил докторскую диссертацию «Переходные процессы при воздействии больших импульсных токов и сильных импульсных магнитных полей на проводящие объекты». Заведующий отделом электромагнитных испытаний в Научно-исследовательском и проектно-конструкторском институте (НИПКИ) «Молния» НТУ «ХПИ», профессор кафедры инженерной электрофизики НТУ «ХПИ».

Кравченко Владимир Иванович окончил в 1972 г. инженерно-физический факультет ХПИ по специальности «Инженерная электрофизика». В 1997 г. в НТУ «ХПИ» защитил докторскую диссертацию «Научно-технические основы обеспечения электромагнитной стойкости технических средств к поражающему действию грозových разрядов». Директор НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ».

* * *

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ и ЧИТАТЕЛЕЙ!

Каждый автор имеет право бесплатно получить 1 экз. журнала с его статьей.
Экземпляры номеров журнала «Электричество» за последние годы
можно приобрести в редакции журнала:
111250 Москва, Красноказарменная ул., 14
(МЭИ, каф. ТОЭ, первый этаж, ком. 3-111, тел./факс 362-7485).