

*С.В. Рудаков, к.т.н., доцент, доц. каф., НУГЗУ,
Т.Н. Курская, к.т.н., доцент, доц. каф., НУГЗУ,
О.В. Миргород, к.т.н., с.н.с., доц. каф., НУГЗУ*

ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ИМПУЛЬСА ТОКА ИСКУССТВЕННОЙ МОЛНИИ НА ПОЖАРОУСТОЙЧИВОСТЬ ПОКРЫТИЯ НАРУЖНОЙ КРОВЛИ ИЗ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ

(представлено д.т.н. Кривцовой В.И.)

Приведены результаты расчетной и опытной оценки электротермической стойкости тонкостенного покрытия наружной кровли высотного технического сооружения из нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т к прямому воздействию на него нормированного по международному стандарту IEC 62305-1-2010 апериодического импульса тока искусственной молнии временной формы 10/350 мкс с амплитудой от 100 до 200 кА и заданными допусками на его амплитудно-временные параметры. Показано, что указанный импульсный ток молнии вызывает локальное поверхностное термическое повреждение исследуемого стального покрытия при радиусе данной зоны повреждения не более 30 мм и глубине проплавления его стенки не более 50 мкм., что может произвести к возгоранию теплоизолирующих материалов.

Ключевые слова: пожарная безопасность, импульс тока искусственной молнии временной формы 10/350 мкс, тонкостенное покрытие из нержавеющей стали, электротермическое действие тока молнии на стальное покрытие, радиус и глубина зоны проплавления стенки стального покрытия, расчетная и опытная оценка зоны повреждения покрытия.

Постановка проблемы. Современные кровельные системы характеризуются высокими физико-механическими свойствами, обеспечивающими высокую эксплуатационную надежность конструкции. Основным преимуществом использования металлических кровельных систем есть долговечность, экономичность, пожаробезопасность. Наиболее высокий уровень пожарной опасности технического сооружения может возникнуть при прямом ударе молнии. В ходе испытаний на молниезащиту зданий и сооружений выполняется измерение величины импульсных перенапряжений после имитации удара молнии и распределения потенциалов по системе заземления и металлоконструкциям.

Однако результаты этих испытаний не всегда позволяют дать объективную оценку уровню пожарной безопасности зданий и сооружений при прямом попадании молнии в покрытие наружной кровли.

Одной из проблем при проведении данных испытаний является получение апериодического импульса тока искусственной молнии, нормированного по международному стандарту, и определение степени электротермического повреждения металлических и изоляционных материалов наружной кровли, что может привести к предотвращению возможного возгорания.

Анализ последних исследований и публикаций. В [1] авторами были приведены результаты расчетно-экспериментальных исследований электротермической стойкости опытных листовых тонкостенных (толщиной 1 мм и размером в плане 500 x 500 мм) образцов наружной кровли из нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т высотных технических сооружений к прямому воздействию на них нормированных A - и C - компонент импульсного тока искусственной молнии. Как известно, в указанном случае импульсная затухающая синусоидальная A - компонента тока молнии характеризовалась следующими нормированными АВП (амплитудно-временные параметры) [2,3]: амплитудой тока $I_{mA}=\pm 200$ кА (при допуске ± 10 %); интегралом действия тока $J_A=2\cdot 10^6$ А²·с (при допуске ± 20 %); временем, соответствующем амплитуде тока I_{mA} , составляющем $t_{mA}\leq 50$ мкс; продолжительностью протекания тока $\tau_{pA}\leq 500$ мкс. Длительная апериодическая C - компонента тока молнии в этом случае имела следующие нормированные АВП [2,3]: амплитуду тока $I_{mC}=\pm(200-800)$ А; переносимый током электрический заряд $q_C=\pm 200$ Кл (при допуске ± 20 %); продолжительность протекания тока $\tau_{pC}=(0,25-1)$ с. Согласно действующим требованиям международного стандарта IEC 62305-1-2010 [5] при оценке защиты от короткого удара молнии зданий, технических сооружений и их частей, включая находящиеся в них людей и инженерных сетей, используется нормированный апериодический импульс тока грозового разряда временной формы $T_1/T_2=10$ мкс/350 мкс положительной полярности, где T_1 , T_2 – соответственно длительность фронта и длительность полуспада импульса тока молнии. Другие основные АВП такого импульса тока молнии для I уровня молниезащиты ТО характеризуются следующими численными значениями [5]: амплитудой тока $I_{mL}=200$ кА (при допуске ± 10 %); интегралом действия тока (удельной энергией) $J_L=10\cdot 10^6$ А²·с (при допуске ± 35 %); количеством протекшего электрического заряда $q_L=100$ Кл (при допуске ± 20 %). Для II уровня молниезащиты ТО рассматриваемые АВП тока молнии имеют нижеследующие численные значения [5]: амплитуду тока $I_{mL}=150$ кА (при допуске ± 10 %); интеграл действия тока (удельную энергию) $J_L=5,6\cdot 10^6$ А²·с (при допуске ± 35 %); количество протекшего электрического заряда $q_L=75$ Кл (при допуске ± 20 %). Для наиболее низких III–IV уровней молниезащиты ТО указанные АВП тока грозового разряда должны соответствовать следующим техническим требованиям [5]: амплитуде тока $I_{mL}=100$ кА (при допуске ± 10 %); интегралу действия тока (удельной энергии) $J_L=2,5\cdot 10^6$ А²·с (при допуске ± 35 %); количеству протекшего электрического заряда $q_L=50$ Кл (при допуске ± 20 %).

Постановка задачи и ее решение. Практический интерес представляет электрофизическая задача, связанная с оценкой электротермической стойкости тонкостенных листовых покрытий из нержавеющей стали наружной кровли высотных технических сооружений к прямому воздействию на них апериодического импульса тока короткого удара молнии временной формы 10/350 мкс.

В рамках данного исследования рассмотрим плоское листовое тонкостенное стальное покрытие толщиной $h\leq 1$ мм, испытывающее в воздуш-

ной среде с установившейся температурой θ_0 прямое воздействие на него сильноточного плазменного цилиндрического канала короткого грозового разряда с импульсным апериодическим током $i_L(t)$, соответствующим техническим требованиям [5]. Пусть канал молнии в зоне его привязки на наружной поверхности стального покрытия, выполненного из нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т [1], имеет максимальный радиус r_0 , удовлетворяющий в системе СИ в месте размещения защищаемого ТО известной формуле Брагинского [6]: $r_0 \approx 0,093 \cdot (I_{mL})^{1/3} \cdot (t_{mL})^{1/2}$, где I_{mL} – амплитуда апериодического импульса тока молнии временной формы 10/350 мкс, а t_{mL} – время, соответствующее амплитуде тока I_{mL} . Примем, что величину t_{mL} можно приближенно определить из соотношения вида [7]: $t_{mL} \approx 1,6 \cdot T_1$. Полагаем, что плотность импульсного тока δ_L и плотность теплового потока g_L в цилиндрическом плазменном канале молнии практически равномерно распределены по его круглому поперечному сечению $S_k = \pi r_0^2$. Одним из подтверждений тому является то, что в сильноточном канале электрического газового разряда термодинамические электронные и ионные температуры его низкотемпературной плазмы в первом приближении характеризуются практически однородным распределением по его радиусу r_0 [8]. Считаем, что в процессе воздействия канала молнии на рассматриваемое тонкостенное стальное покрытие округлая зона его привязки радиусом r_0 остается практически неподвижной относительно стенки покрытия. Принимаем то допущение, что объем V_0 расплавленного апериодическим импульсом тока молнии $i_L(t)$ металла покрытия определяет в конечном счете объем зоны его повреждения и при соответствующих условиях форму зоны его проплавления. Расчетную оценку результатов электротермического действия указанного сильноточного цилиндрического канала молнии на стальное покрытие ТО выполним в предположении неизменности в процессе короткого удара грозового разряда основных теплофизических характеристик материала рассматриваемого покрытия ТО.

Как известно, термическое повреждение металлических и изоляционных (композиционных) элементов ТО в местах прямого удара в них молнии обусловлено наличием интенсивного теплового потока в плазменном канале грозового разряда [9]. Плотность g_L теплового потока в канале молнии, воздействующая на исследуемое стальное покрытие ТО, определяется плотностью δ_L тока в нем (канале) и падением электрического напряжения U_{ac} в приэлектродной зоне плазменного канала рассматриваемого сильноточного разряда. Для оценки величины плотности g_L теплового потока, поступающего в стальное покрытие (в один из электродов в расчетной двухэлектродной воздушной системе грозового разряда) ТО, можно воспользоваться следующим приближенным соотношением [10, 11]:

$$g_L = \delta_L \cdot U_{ac}, \quad (1)$$

где U_{ac} – величина приэлектродного падения напряжения в области стального покрытия, выполняющего в двухэлектродной системе (ДЭС)

роль катода при заданной положительной полярности тока молнии.

Применительно к рассматриваемому нами стальному покрытию-катоде величина U_{ac} численно составляет около 6,1 В [10]. Тогда, с учетом (1) для количества тепла Q , поступающего в стальное покрытие при прямом ударе в него молнии, можно записать следующее расчетное соотношение

$$Q = \pi \int_0^{\infty} g_L r_0^2 dt = \pi U_{ac} \int_0^{\infty} \delta_L r_0^2 dt = U_{ac} q_L, \quad (2)$$

где $q_L = \int_0^{\infty} i_L(t) dt$ – количество электрического заряда положительной полярности из плазменного канала молнии, протекающего через стальное покрытие.

С другой стороны, для величины количества тепла Q , выделившегося в материале стального покрытия при его поражении прямым ударом молнии, будет справедливо следующее расчетное соотношение [12]:

$$Q = m_0 [C_0(\theta_m - \theta_0) + C_m], \quad (3)$$

где $m_0 = d_0 V_0$ – масса нагреваемого импульсным током молнии до температуры плавления θ_m материала покрытия, имеющего плотность d_0 и объем V_0 ; C_0 – теплоемкость материала покрытия; C_m – удельная теплота плавления материала покрытия.

Из (2) и (3) для величины объема V_0 расплавленного материала стального покрытия ТО при воздействии на него короткого удара молнии получаем расчетное выражение вида

$$V_0 = U_{ac} q_L d_0^{-1} [C_0(\theta_m - \theta_0) + C_m]^{-1}. \quad (4)$$

Из (4) видно, что полученное нами описанным выше приближенным электрофизическим путем расчетное аналитическое соотношение для нахождения расплавленного импульсным аperiodическим током молнии $i_L(t)$ объема V_0 тонкостенного стального покрытия ТО полностью соответствует оценочному соотношению, рекомендуемому в этом случае согласно [5] международным стандартом ИЕС 62305-1-2010. В табл. 1 приведены численные данные для основных электро- и теплофизических параметров используемой нами марки стали для тонкостенного покрытия кровли ТО.

Тогда из (4) и данных табл. 1 следует, что для расчетной оценки величины расплавленного коротким ударом молнии объема V_0 металла покрытия ТО необходимо знать лишь величину электрического заряда q_L , протекшего через исследуемое покрытие. Для нахождения величины заряда q_L по (2) используем следующее аналитическое выражение для аperiodического импульса тока молнии $i_L(t)$ временной формы 10/350 мкс, протекающего по покрытию ТО [14,15]:

$$i_L(t) = k_L I_{mL} [\exp(-\alpha_1 t) - \exp(-\alpha_2 t)], \quad (5)$$

где $\alpha_1 \approx 0,76/T_2$, $\alpha_2 \approx 2,37/T_1$ – соответственно коэффициенты формы апериодического импульса тока молнии с заданными АВП; $k_L = [(\alpha_1/\alpha_2)^\beta - (\alpha_1/\alpha_2)^\gamma]^{-1}$ – нормирующий коэффициент; $\beta = \alpha_1/(\alpha_2 - \alpha_1)$; $\gamma = \alpha_2/(\alpha_2 - \alpha_1)$.

Табл. 1. Основные электро-теплофизические параметры для стали марки 12X18H10T при комнатной температуре ($\theta_0 = 20$ °С) воздушной среды [1, 10, 13]

Параметр	Размерность	Значение
U_{ac}	В	6,1
d_0	кг/м ³	7900
C_0	Дж/(кг·°С)	462
θ_m	°С	1455
C_m	Дж/кг	$84 \cdot 10^3$

В результате с учетом (5) для величины электрического заряда q_L , протекающего при используемой временной форме $T_1/T_2 = 10/350$ мкс апериодического импульса тока через поражаемое коротким ударом молнии исследуемое стальное покрытие ТО, находим

$$q_L = \int_0^{\infty} i_L(t) dt \approx k_L I_{mL} [1,315 T_2 - 0,422 T_1]. \quad (6)$$

Расчетная численная оценка величины заряда q_L по предлагаемому соотношению (6) показывает, что при заданной временной форме $T_1/T_2 = 10/350$ мкс импульса тока молнии $i_L(t)$ по (5) с найденным нами нормирующим коэффициентом $k_L \approx 1,054$ и нормированных согласно техническим требованиям [5] амплитудах этого импульсного тока $I_{mL} = 100$ кА и $I_{mL} = 200$ кА величина заряда q_L принимает соответственно численные значения 48,1 и 96,2 Кл. Эти оценочные по (6) значения заряда q_L для указанных выше двух нормированных случаев лишь на не более чем 4 % отличаются от его (заряда) соответствующих нормированных значений, принимающих по требованиям [5] численные показатели в 50 и 100 Кл. Соотношение (6) может быть использовано в области молниезащиты ТО для расчетных оценок величины электрического заряда q_L , протекающего через металлическое покрытие ТО при прямом воздействии на него короткого удара молнии.

При определении последствий электротермического воздействия короткого удара молнии на металлическое или изоляционное (композиционное) покрытие ТО важным параметром такого действия является нормированный в [5] интеграл действия J_L импульсного тока молнии $i_L(t)$ (удельная энергия с размерностью Дж/Ом). Используя (5), для интеграла действия J_L апериодического импульса тока молнии $i_L(t)$ временной формы $T_1/T_2 = 10/350$ мкс в принятом приближении получаем следующее расчетное соотношение

$$J_L = \int_0^{\infty} i_L^2(t) dt \approx k_L^2 I_{mL}^2 [0,658T_2 - 0,633T_1]. \quad (7)$$

Из (7) при $T_1/T_2=10/350$ мкс ($k_L \approx 1,054$) в нормируемых по требованиям [5] случаях, когда $I_{mL}=100$ кА или $I_{mL}=200$ кА, следует, что величина интеграла действия J_L принятого апериодического импульса тока молнии $i_L(t)$ принимает соответственно расчетные численные значения $2,49 \cdot 10^6$ и $9,96 \cdot 10^6$ А²·с. Эти полученные нами оценочные значения величины интеграла действия J_L рассматриваемого импульса тока молнии не более чем на 1 % отличаются от нормируемых при этом в [5] численных значений J_L , составляющих соответственно $2,5 \cdot 10^6$ и $10 \cdot 10^6$ А²·с. Поэтому соотношение (7) может использоваться в области молниезащиты ТО при расчетных оценках величины интеграла действия J_L апериодического импульса тока линейной молнии временной формы $T_1/T_2=10/350$ мкс, воздействующего на металлическое или изоляционное (композиционное) покрытие защищаемого ТО.

Расчитаем глубину лунки проплавления стенки стального покрытия. Исходя из (4) и цилиндрической формы указанным радиусом r_0 лунки термического повреждения на наружной плоской поверхности исследуемого металлического покрытия ТО из-за действия сильноточного канала молнии, для глубины h_m лунки проплавления получаем

$$h_m = 36,8 \cdot U_{ac} q_L d_0^{-1} I_{mL}^{-2/3} t_{mL}^{-1} [C_0(\theta_m - \theta_0) + C_m]^{-1}. \quad (8)$$

Из (8) при нормированной амплитуде $I_{mL} \approx 184$ кА импульса тока короткого удара искусственной молнии временной формы $T_1/T_2=15/315$ мкс ($t_{mL} \approx 24$ мкс; $k_L \approx 1,083$; $q_L \approx 81,3$ Кл), имитированного нами в лабораторных условиях и исходных электро- и теплофизических параметрах для нержавеющей стали марки 12X18Н10Т рассматриваемого тонкостенного ($h \leq 1$ мм) покрытия ТО, приведенных в табл. 1, для глубины h_m лунки проплавления следует, что она численно составляет около 39,8 мкм. При этом максимальный радиус $r_0 \approx 0,093 \cdot (I_{mL})^{1/3} \cdot (t_{mL})^{1/2}$ цилиндрической лунки проплавления для стального покрытия оказывается численно равным около 25,9 мм.

Рассчитаем радиус лунки сквозного проплавления стенки стального покрытия. Исходя из (4), для тонкостенного стального покрытия, когда с учетом (8) выполняется условие сквозного проплавления импульсным апериодическим током молнии $i_L(t)$ временной формы $T_1/T_2=10/350$ мкс его стенки $h_m \geq h$, расчетное соотношение для радиуса r_m лунки сквозного проплавления стенки исследуемого покрытия принимает следующий приближенный вид

$$r_m = \{U_{ac} q_L (\pi h d_0)^{-1} [C_0(\theta_m - \theta_0) + C_m]^{-1}\}^{1/2}. \quad (9)$$

Количественная оценка по (9) величины радиуса r_m округлой лунки сквозного проплавления стенки рассматриваемого стального покрытия ТО толщиной $h \approx h_m \approx 40$ мкм коротким ударом молнии с указанными нормированными по [5] значениями АВП импульсного тока ($I_{mL} \approx 184$ кА; $T_1 \approx 15$ мкс; $T_2 \approx 315$ мкс; $k_L \approx 1,083$; $q_L \approx 81,3$ Кл) показывает, что в этом случае она принимает численное значение, примерно равное 25,9 мм. В рассматриваемом приближении численное значение радиуса r_m лунки сквозного проплавления стенки покрытия практически соответствует расчетному значению максимального радиуса r_0 канала молнии, определяемому приведенной выше формулой Брагинского [6]. Данный результат указывает на достоверность полученного расчетного соотношения (9).

Расчетная оценка температуры плазмы сильноточного канала грозового воздушного искрового разряда. При комплексном подходе к рассматриваемой нами электрофизической задаче специалистам важно ориентироваться в численных уровнях температуры, возникающих в сильноточных воздушных искровых разрядах молнии и непосредственно воздействующих на наружные элементы защищаемых ТО. Для низкотемпературной плазмы сильноточного воздушного искрового разряда молнии при временах $t \leq t_{mL}$ выполняется условие ее неизотермичности, при котором в ней (плазме) максимальная температура T_{me} носителей электронного тока превышает максимальную температуру T_{mi} носителей ионного тока ($T_{me} > T_{mi}$) [12]. Используя результаты прикладных исследований, приведенные в [11,15], для максимальной электронной температуры T_{me} плазмы канала короткого разряда молнии в атмосферном воздухе при нормальных условиях (давление воздуха составляет $1,013 \cdot 10^5$ Па, а его температура равна $\theta_0 = 0$ °С [12]) можно записать следующее приближенное расчетное соотношение

$$T_{me} \approx 3,28 \cdot \sqrt[4]{I_{mL}^{1/3} U_{ac} / (\sigma_c t_{mL})}, \quad (10)$$

где $\sigma_c = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт·(м²·К⁴)⁻¹ – постоянная Стефана-Больцмана [12].

Подставив в (10) при $\sigma_c = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт·(м²·К⁴)⁻¹ и $U_{ac} = 6,1$ В соответствующие исходные численные данные для нормированного по требованиям [5] апериодического импульса тока молнии временной формы $T_1/T_2 = 10/350$ мкс ($I_{mL} \approx 2 \cdot 10^5$ А; $t_{mL} \approx 16 \cdot 10^{-6}$ с), находим, что в исследуемом случае максимальная электронная температура T_{me} плазмы сильноточного канала грозового воздушного разряда численно составляет $T_{me} \approx 14,6 \cdot 10^3$ К. Полученное по (10) численное значение для электронной температуры T_{me} хорошо согласуется с приведенными в [16,17] известными экспериментальными результатами для рассматриваемых температур плазменных сильноточных каналов воздушных искровых разрядов, широко применяемых в электротехнологиях, базирующихся на основе высоковольтной импульсной техники [18].

Измерение АВП апериодического импульса тока искусственной молнии, формируемого в сильноточной разрядной цепи ГИТМ-10/350 и

воздействующего на опытный листовой образец стальной кровли ТО проводилось с помощью коаксиального шунта типа ШК-300 [4], имеющего коэффициент преобразования $K_{mL} \approx 10417$ А/В, и цифрового запоминающего осциллографа типа Tektronix TDS 1012. На рис. 1 приведена осциллограмма получаемого с помощью высоковольтного ГИТМ-10/350 аperiodического импульса тока $i_L(t)$ искусственной молнии положительной полярности при коротком грозовом воздушном разряде.

Из данных рис. 1 следует, что воздействующий на опытный листовой образец стальной кровли импульс тока короткого удара искусственной молнии в целом соответствует жестким требованиям международного стандарта IEC 62305-1-2010 [5] применительно к III–IV уровням молниезащиты ТО. Основные АВП протекающего через опытный стальной образец ТО толщиной $h=1$ мм нормированного импульса тока имитированной молнии при этом имели следующие численные значения: $I_{mL} \approx 100$ кА; $T_1 \approx 15$ мкс; $T_2 \approx 315$ мкс; $q_L \approx 44,2$ Кл; $J_L \approx 2,32 \cdot 10^6$ А²·с.

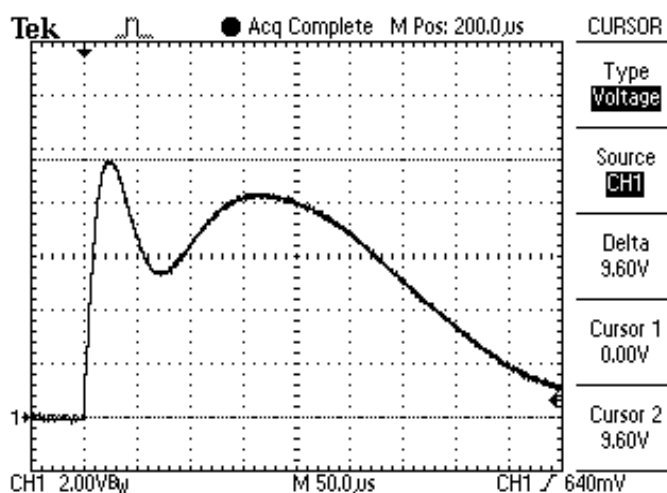


Рис. 1. Осциллограмма нормированного аperiodического импульса тока искусственной молнии временной формы 15/315 мкс с амплитудой $I_{mL} \approx 100$ кА ($q_L \approx 44,2$ Кл; $J_L \approx 2,32 \cdot 10^6$ А²·с), воздействующего в цепи ГИТМ-10/350 на опытный тонкостенный ($h=1$ мм) листовой образец наружной кровли ТО из нержавеющей стали марки 12X18H10T

На рис. 2 показана осциллограмма нормированного по техническим требованиям [5] аperiodического импульса тока искусственной молнии временной формы $T_1/T_2=15/315$ мкс, воздействующего в сильноточной разрядной цепи ГИТМ-10/350 на опытный образец стальной кровли ТО и практически соответствующего I уровню молниезащиты ТО ($I_{mL} \approx 184$ кА; $T_1 \approx 15$ мкс; $T_2 \approx 315$ мкс; $q_L \approx 81,3$ Кл; $J_L \approx 7,88 \cdot 10^6$ А²·с).

Из локального скачкообразного “хода” на рис. 2 кривой импульса тока короткого удара искусственной молнии (на его спаде) в разрядной цепи мощной электроустановки следует, что данный импульс тока молнии $i_L(t)$ с указанным нормированным по [5] значением интеграла действия $J_L \approx 7,88 \cdot 10^6$ А²·с приводит к большим электротермическим и электродинамическим воздействиям на исследуемый стальной образец. Численная оценка тепловой энергии W_i , выделяющейся на диске используе-

мого измерительного шунта типа ШК-300 [4], может быть выполнена по следующей приближенной формуле

$$W_i \approx R_i J_L \quad (11)$$

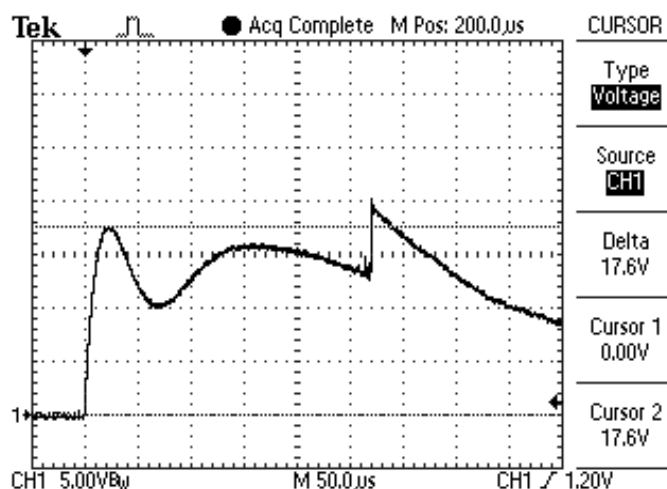


Рис. 2. Осциллограмма нормированного аperiodического импульса тока искусственной молнии временной формы 15/315 мкс с амплитудой $I_{mL} \approx 184$ кА ($q_L \approx 81,3$ Кл; $J_L \approx 7,88 \cdot 10^6$ А²·с), воздействующего в цепи ГИТМ-10/350 на опытный тонкостенный ($h=1$ мм) листовый образец наружной кровли ТО из нержавеющей стали марки 12X18H10T

Из (11) при указанных исходных данных ($R_i \approx 0,2$ мОм; $J_L \approx 7,88 \cdot 10^6$ А²·с) следует, что в рассматриваемом опыте ($I_{mL} \approx 184$ кА; $T_1 \approx 15$ мкс; $T_2 \approx 315$ мкс; $q_L \approx 81,3$ Кл) на измерительном шунте типа ШК-300 (в основном на его высокоомном нихромовом тонкостенном диске) выделяется энергия около $W_i \approx 1,6$ кДж.

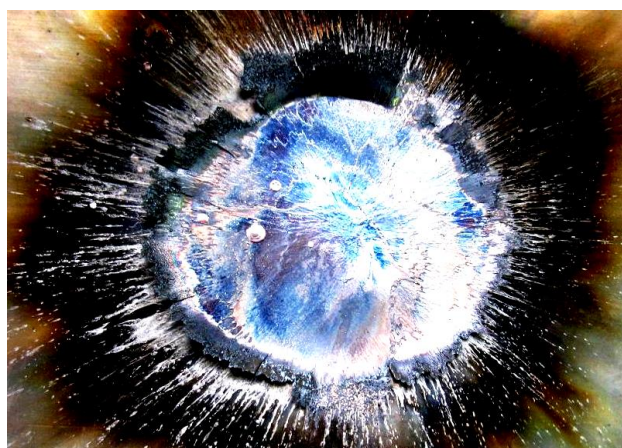


Рис. 3. Результаты электротермического воздействия нормированного аperiodического импульса тока искусственной молнии временной формы 15/315 мкс с амплитудой $I_{mL} \approx 184$ кА на опытный тонкостенный ($h=1$ мм) образец кровли ТО из нержавеющей стали марки 12X18H10T

Из данных рис. 3 видно, что прямое воздействие на опытный листовый образец кровли ТО из нержавеющей стали марки 12X18H10T толщиной $h=1$ мм нормированного аperiodического импульса тока искусствен-

ной молнии временной формы 15/315 мкс с амплитудой $I_{mL} \approx 184$ кА ($q_L \approx 81,3$ Кл; $J_L \approx 7,88 \cdot 10^6$ А²·с), формируемого в разрядной цепи ГИТМ-10/350, приводит к существенному термическому повреждению лишь его (образца) наружной поверхности в округлой зоне привязки на ней цилиндрического канала сильноточного воздушного искрового разряда имитированной молнии на стадии ее короткого удара. При этом радиус зоны термического повреждения рассматриваемого стального покрытия соответствует радиусу $r_0 \approx 0,093 \cdot (I_{mL})^{1/3} \cdot (t_{mL})^{1/2}$ согласно формуле Брагинского для сильноточного плазменного канала искусственного воздушного грозового разряда [6,7], составляющему около 27 мм. Одной из особенностей данной зоны повреждения является образование по ее округлому периметру торчащей наружу в отрыве от наружной поверхности исследуемого листового покрытия пикообразной стальной “бороды” длиной до 15 мм, толщина которой составляет примерно 40 мкм. Образование подобной “бороды” при прямом воздействии в воздухе на рассматриваемое стальное покрытие короткого удара искусственной молнии с импульсом тока временной формы $T_1/T_2 = 15/315$ мкс связано с поверхностным расплавлением стального покрытия в округлой зоне привязки на нем канала молнии и последующим радиальным выбросом наружу расплавленного металла из-за действующих на него электродинамических сил Лоренца [12]. Обследование эпицентра зоны термического повреждения испытываемого в разрядной цепи ГИТМ-10/350 стального покрытия ТО показывает, что в этом случае ($I_{mL} \approx 184$ кА; $q_L \approx 81,3$ Кл; $J_L \approx 7,88 \cdot 10^6$ А²·с) глубина h_m лунки проплавления стенки покрытия из нержавеющей стали марки 12X18Н10Т ($h = 1$ мм) не превышает 42 мкм. Данное полученное опытным путем численное значение глубины h_m практически соответствует ее расчетному значению, определенному нами ранее по (8).

Выводы. Результаты оценочных расчетных и экспериментальных исследований электротермической стойкости опытных листовых образцов наружной кровли защищаемого ТО размером в плане 500 x 500 мм из нержавеющей стали марки 12X18Н10Т толщиной $h = 1$ мм к прямому воздействию на них в воздухе нормированного по международному стандарту ИЕС 62305-1-2010 аperiodического импульса тока искусственной молнии временной формы 10/350 мкс с соответствующими допусками на его АВП указывают на то, что исследуемые тонкостенные стальные образцы ТО подвергаются локальному поверхностному термическому повреждению, и как следствие, может привести к возгоранию теплоизоляционных материалов, находящихся непосредственно под наружной кровлей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Баранов М.И. Результаты расчетно-экспериментальных исследований электротермической стойкости опытных образцов из листовой стали к воздействию нормированных компонент импульсного тока искусственной молнии / М.И. Баранов, В.В. Князев, В.И. Кравченко, С.В.

- Рудаков // Электротехніка і електромеханіка.– 2016.– №3.– С.40–49.
2. SAE ARP 5412: 2013 Aircraft Lightning Environment and Related Test Waveforms/ SAE Aerospace. USA, 2013.– pp.1–56.
 3. SAE ARP 5416: 2013 Aircraft Lightning Test Methods / SAE Aerospace. USA, 2013.– pp.1–145.
 4. Баранов М.И. Генератор тока искусственной молнии для натуральных испытаний технических объектов / М.И. Баранов, Г.М. Колиушко, В.И. Кравченко, О.С. Недзельский, В.Н. Дныщенко // Приборы и техника эксперимента. – 2008. – №3. – С.81–85.
 5. IEC 62305-1: 2010. Protection against lightning. Part 1: General principles. Geneva, IEC Publ., 2010, pp. 1–72.
 6. Лозанский Э.Д., Фирсов О.Б. Теория искры.– М.: Атомиздат, 1975.– 272 с.
 7. Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики: Монография в 2-х томах. Том 2, Кн. 2: Теория электрофизических эффектов и задач.– Х.: Точка, 2010.– 407 с.
 8. Райзер Ю.П. Физика газового разряда.–М.: Наука, 1987.– 592 с.
 9. Кужекин И.П., Ларионов В.П., Прохоров Е.Н. Молния и молниезащита.– М.: Знак, 2003.– 330 с.
 10. Абрамов Н.Р. Характеристики проплавления стенок металлических объектов при воздействии на них молнии / Н.Р. Абрамов, И.П. Кужекин, В.П. Ларионов // Электричество.– 1986.– №11.– С.22–27.
 11. Баранов М.И. Виникнення локальних осередків пожежі кабельної продукції при дії на неї надструмів /М.И. Баранов, С.В. Рудаков // Проблемы пожарной безопасности (г. Харьков). – 2015. – Вып. 37. – С. 20-26. – Режим доступа: http://nuczu.edu.ua/sciencearchive/Problems Of-FireSafety/ vol37/Ppb_2015_37_6.pdf
 12. Кузьмичев В.Е. Законы и формулы физики / Отв. ред. В.К. Тартаковский.– Киев: Наукова думка, 1989.– 864 с.
 13. http://www.sgkarkas.ru/spravochnik/marochnik_stalej/12h18n10t
 14. Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики: Монография. Том 3: Теория и практика электрофизических задач.– Х.: Точка, 2014.– 400 с.
 15. Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики: Монография в 2-х томах. Том 2, Кн. 1: Теория электрофизических эффектов и задач.– Х.: НТУ “ХПИ”, 2009.– 384 с.
 16. Техника больших импульсных токов и магнитных полей / Под ред. В.С. Комелькова.– М.: Атомиздат, 1970.– 472 с.
 17. Гулый Г.А. Научные основы разрядно-импульсных технологий.– К.: Наукова думка, 1990.– 208 с.
 18. Месяц Г.А. Импульсная энергетика и электроника.– М.: Наука, 2004.– 704 с.
 19. Баранов М.И. Мощный высоковольтный генератор апериодических импульсов тока искусственной молнии с нормированными по международному стандарту IEC 62305-1-2010 амплитудно-временными

параметрами / М.И. Баранов, Г.М. Колиушко, В.И. Кравченко, С.В. Рудаков // Електротехніка і електромеханіка.– 2015.– №1.– С.51–56.

20. Baranov M.I. A generator aperiodic current pulses of artificial lightning with a rationed temporal form of 10/350 μ s with an amplitude of \pm (100-200) kA / M.I. Baranov, G.M.Koliushko, V.I. Kravchenko, S.V. Rudakov // Instruments and Experimental Techniques.– 2015.– Vol. 58.– No. 6.– pp.745–750.

Получено редколлегией 12.03.2019

С.В. Рудаков, О.В. Миргород, Т.М. Курська

Електротермічний вплив імпульсу струму штучної блискавки на пожежостійкість покриття зовнішньої покрівлі з нержавіючої сталі

Приведені результати розрахункової і досвідної оцінки електротермічної стійкості тонкостінного покриття зовнішньої крівлі висотної технічної споруди з неіржавіючої сталі мазкі 12Х18Н10Т до прямої дії на нього нормованого за міжнародним стандартом ІЕС 62305-1-2010 аперіодичного імпульсу струму штучної блискавки часової форми 10/350 мкс з амплітудою від 100 до 200 кА і заданими допусками на його амплітудно-часові параметри. Показано, що вказаний імпульсний струм блискавки викликає лише локальне поверхнєве термічне пошкодження досліджуваного сталевого покриття при радіусі даної зони пошкодження не більше 30 мм і глибині проплавлення його стінки не більше 50 мкм, що може призвести до загоряння тепло ізолюючих матеріалів.

Ключові слова: пожежна безпека, імпульс струму штучної блискавки часової форми 10/350 мкс, тонкостінне покриття з неіржавіючої сталі, електротермічна дія струму блискавки на сталеве покриття, радіус і глибина зони проплавлення стінки сталевого покриття, розрахункова і досвідна оцінка зони пошкодження покриття.

S. Rudakov, O. Mirgorod, T. Kurskaya

The Assessment of the impact of electrothermal pulse of current of artificial lightning on the fire resistance of the outer coating of the roof with stainless steel

The results of numerical and experimental assessment of the electro-thermal resistance of thin-walled covering of an exterior roof of high-rise constructions of stainless steel 12X18H10T to the direct influence of the normalized according to the international standard IEC 62305-1-2010 aperiodic pulse of current of artificial lightning in a temporary form 10/350 μ s c amplitude from 100 to 200 kA and the specified tolerances on the amplitude and time parameters. It is shown that the specified impulse lightning current causes a local surface thermal damage of the investigated steel coating when the radius of the damage zone, not more than 30 mm and the depth of penetration of its wall of not more than 50 microns., that can produce a fire insulating materials.

Keywords: fire safety, rationed impulses of current of short blow of artificial lightning, powerful high-voltage impulses current of short blow of artificial lightning, pre-production sheet steel model of outward roof of the protected technical object, electrothermal resistibility to lightning of pre-production models from stainless steel.