

РАСЧЕТНАЯ И ОПЫТНАЯ ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НОРМИРОВАННОГО ПО МЕЖДУНАРОДНОМУ СТАНДАРТУ IEC 62305-1-2010 ИМПУЛЬСА ТОКА КОРОТКОГО УДАРА ИСКУССТВЕННОЙ МОЛНИИ НА ТОНКОСТЕННОЕ ПОКРЫТИЕ ИЗ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ

Приведені результати розрахункової і досвідної оцінки електротермічної стійкості тонкостінного покриття зовнішньої крівлі висотної технічної споруди з неіржавіючої сталі маркі 12Х18Н10Т до прямої дії на нього нормованого за міжнародним стандартом IEC 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 поверхневе термічне пошкодження досліджуваного сталевого покриття при радіусі даної зони пошкодження не більше 30 мм і глибині проплавлення його стінки не більше 50 мкм. Бібл. 20, рис. 4, табл. 1.

Ключові слова: 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.

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 аперіодического 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 лишь 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. Библ. 20, рис. 4, табл. 1.

Ключевые слова: 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.

Введение. 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, амплитудно-временные параметры (АВП) которых соответствовали действующим техническим требованиям нормативных документов США SAE ARP 5412 и SAE ARP 5416 применительно к летательным аппаратам [2,3]. Как известно, в указанном случае импульсная затухающая синусоидальная *A*- компонента тока молнии характеризовалась следующими нормированными АВП [2,3]: амплитудой тока $I_{mA} = \pm 200$ кА (при допуске $\pm 10\%$); интегралом действия тока $J_A = 2 \cdot 10^6$ А²·с (при допуске $\pm 20\%$); временем, соответствующем амплитуде тока I_{mA} , составляющем $t_{mA} \leq 50$ мкс; продолжительностью протекания тока $\tau_{pA} \leq 500$ мкс. Длительная аперіодическая *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 $\pm 20\%$); продолжительность протекания тока $\tau_{pC} = (0,25-1)$ с. Отметим, что в [1] соответствующие эксперименты были выполнены на разработанном и созданном в 2007 году

на экспериментально-испытательном исследовательском полигоне НИПКИ “Молния” НТУ “ХПИ” (в отделе №4 “Электромагнитных исследований и испытаний”) мощном высоковольтном генераторе тока искусственной молнии УИТОМ-1 [4], формирующем на испытываемом техническом объекте (ТО) АВП импульсы тока грозового разряда с описанными *A*- и *C*- компонентами по требованиям указанных нормативных документов [2,3]. Согласно действующим требованиям международного стандарта IEC 62305-1-2010 [5] при оценке защиты от короткого удара молнии зданий, технических сооружений и их частей, включая находящихся в них людей и инженерных сетей, используется нормированный аперіодический 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 $\pm 10\%$); интегралом действия тока (удельной энергией) $J_L = 10 \cdot 10^6$ А²·с (при допуске $\pm 35\%$); количеством протекшего электрического заряда $q_L = 100$ Кл (при допуске $\pm 20\%$). Для II уровня молниезащиты ТО рассматриваемые АВП тока молнии имеют нижеследующие численные значения [5]: амплитуду тока $I_{mL} = 150$ кА (при допуске $\pm 10\%$); ин-

теграл 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 %). В этой связи несомненный 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 аperiodического импульса тока короткого удара молнии временной формы 10/350 мкс с АВП, представленными в [5].

1. Постановка задачи исследования электротермической стойкости тонкостенного стального покрытия к импульсу тока молнии 10/350 мкс. В рамках данного прикладного исследования рассмотрим плоское листовое тонкостенное стальное покрытие толщиной $h \leq 1$ мм, испытывающее в воздушной среде с установившейся температурой θ_0 прямое воздействие на него сильноточного плазменного цилиндрического канала короткого грозового разряда с импульсным аperiodическим 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 аperiodического 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 аperiodическим 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.

2. Расчетная оценка результатов электротермического воздействия на тонкостенное стальное покрытие импульса тока молнии 10/350 мкс. 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.

В соответствии с экспериментальными данными, представленными в [10], величина U_{ac} для основных проводниковых материалов расчетной ДЭС, используемых в летательных (наземных) аппаратах и иных ТО, изменяется в достаточно узком диапазоне, составляющем от 5 до 10 В. 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]:

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

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.

2.1. Расчетная оценка объема зоны расплавления в стенке стального 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:

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

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 IEC 62305-1-2010 (см. в [5] Приложение D, формулу D.9). Ниже в табл. 1 приведены численные данные для основных электро- и теплофизических параметров используемой нами марки стали для тонкостенного покрытия кровли ТО.

Таблица 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	$84 \cdot 10^3$

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 , протекающего 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]:

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

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

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

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

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 она (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. Учитывая последнее, соотношение (6) может быть исполь-

зовано 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 аperiodического импульса тока молнии $i_L(t)$ временной формы $T_1/T_2=10/350$ мкс в принятом приближении получаем следующее расчетное соотношение:

$$J_L = \int_0^{\infty} i_L^2(t) dt \approx k_L^2 I_{mL}^2 \left[6,58T_2 - 0,633T_1 \right]. \quad (7)$$

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 аperiodического 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 аperiodического импульса тока линейной молнии временной формы $T_1/T_2=10/350$ мкс, воздействующего на металлическое или изоляционное (композиционное) покрытие защищаемого ТО.

2.2. Расчетная оценка глубины 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:

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

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 (см. ниже раздел 4), и исходных электро- и теплофизических параметрах для нержавеющей стали марки 12X18H10T 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.

2.3. Расчетная оценка радиуса лунки сквозного проплавления стенки стального покрытия. Исходя из (4), для тонкостенного стального покрытия, когда с учетом (8) выполняется условие сквозного проплавления импульсным аperiodическим 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:

$$r_m = \{U_{ac} q_L (\pi h d_0)^{-1} [\Gamma_0 (\theta_m - \theta_0) + C_m] \}^{1/2}. \quad (9)$$

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. Видно, что 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).

3. 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. При этом будем считать, что 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:

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

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] аperiodического 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. Следует отметить, что 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].

4. Опытная оценка результатов электротехнического воздействия на тонкостенное стальное покрытие импульса тока молнии 10/350 мкс. Экспериментальную проверку работоспособности некоторых приведенных нами расчетных соотношений (в частности, (4), (6), (8) и формулы Брагинского для r_0) выполним на разработанном и созданном в НИПКИ “Молния” НТУ “ХПИ” в 2014 году уникальном мощном высоковольтном генераторе типа ГИТМ-10/350 [19,20], моделирующем на низкоомной и малоиндуктивной электрической нагрузке аperiodические импульсы тока искусственной молнии временной формы $T_1/T_2 = 10/350$ мкс в соответствии с действующими требованиями международного стандарта ИЕС 62305-1-2010 [5]. С этой целью в воздушную ДЭС сильноточной разрядной цепи ГИТМ-10/350, размещенную на рабочем столе данного высоковольтного генератора, при $\theta_0 \approx 20$ °С помещались опытные листовые образцы из нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т, имеющие размер в плане 500 x 500 мм и толщину $h = 1$ мм. Отметим, что в использованной в экспериментах ДЭС с верхним электродом цилиндрической формы диаметром 25 мм, выполненным из стали марки Ст. 3, длина воздушного зазора между его закругленным по радиусу около 12,5 мм краем и опытным листовым образцом из нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т составляла примерно 14 мм. Для инициирования над опытным стальным образцом сильноточного плазменного канала искрового разряда короткого удара искусственной молнии в воздушный промежуток ДЭС помещалась тонкая медная проволока диаметром 0,2 мм и длиной около 37 мм, закрепленная на ее верхнем стальном электроде и подходящая нормально сверху к плоскости опытного образца стальной кровли ТО с воздушным зазором длиной примерно в 3 мм.

Измерение АВП аperiodического импульса тока искусственной молнии, формируемого в сильноточной разрядной цепи ГИТМ-10/350 и воздействующего на опытный листовый образец стальной кровли ТО проводилось с помощью поверенных государственной метрологической службой измерительного 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 в рассматриваемом случае с помощью высоковольтного ГИТМ-10/350 аperiodического импульса тока $i_L(t)$ искусственной молнии положительной полярности при коротком грозовом воздушном разряде.

Укажем, что при получении приведенной на рис. 1 осциллограммы аperiodического импульса тока искусственной молнии в сильноточной разрядной цепи высоковольтного ГИТМ-10/350 три его генератора импульсных токов (ГИТ) содержали в общем количестве 171 шт. параллельно включенных и заряжаемых до постоянного электрического напряжения $U_{c1-3} \approx 17$ кВ высоковольтных импульсных конденсаторов типа ИК-50-3, а четвертый ГИТ был построен на основе 288 шт. последовательно-параллельно включенных и параллельно заряжаемых до постоянного электрического напряжения $U_{c4} \approx 4,5$ кВ высоковольтных импульсных конденсаторов типа ИМ2-5-140 (на

их выходе) [19,20]. Из данных рис. 1 следует, что воздействующий в указанном случае на опытный листовый 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. Подтверждением тому является то, что 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.

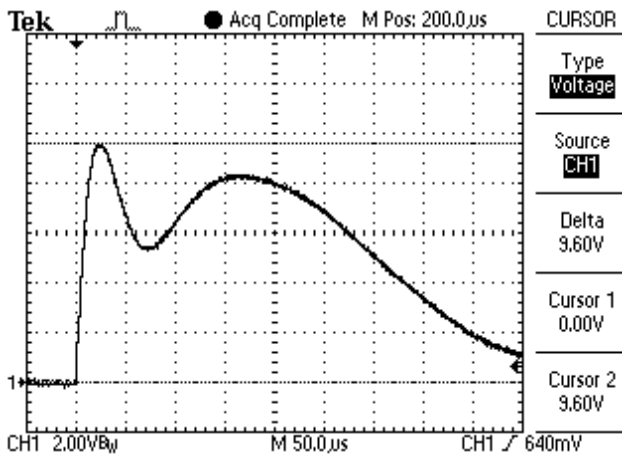


Рис. 1. Осциллограмма нормированного аperiodического импульса тока искусственной молнии временной формы 15/315 мкс с амплитудой $I_{mL} \approx 100$ кА ($q_L \approx 44,2$ Кл; $J_L \approx 2,32 \cdot 10^6$ А²·с), воздействующего в цепи ГИТМ-10/350 на опытный тонкостенный ($h=1$ мм) листовый образец наружной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

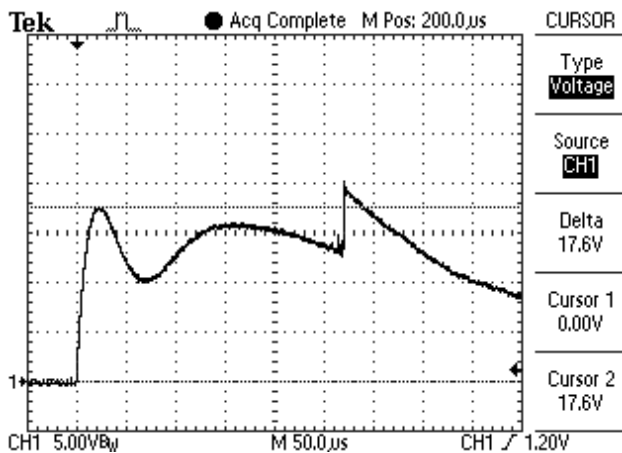


Рис. 2. Осциллограмма нормированного аperiodического импульса тока искусственной молнии временной формы 15/315 мкс с амплитудой $I_{mL} \approx 184$ кА ($q_L \approx 81,3$ Кл; $J_L \approx 7,88 \cdot 10^6$ А²·с), воздействующего в цепи ГИТМ-10/350 на опытный тонкостенный ($h=1$ мм) листовый образец наружной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

Из локального скачкообразного “хода” на рис. 2 кривой импульса тока короткого удара искусственной молнии (на его спаде) в разрядной цепи мощной электроустановки ГИТМ-10/350 ($U_{c1-3} \approx 31$ кВ; $U_{c4} \approx 9,4$ кВ), размещенной на экспериментально-испытательном исследовательском полигоне НИПКИ “Молния” НТУ “ХПИ” (в отделе №4 “Электромагнитных исследований и испытаний”), протекающего через опытный листовый стальной образец кровли ТО и измерительный коаксиальный шунт типа ШК-300, 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 не только на исследуемый стальной образец (рис. 3), но и на токопроводящие элементы конструкции используемого коаксиального шунта. Укажем, что активное сопротивление высоковольтной бифилярной цепи шунта типа ШК-300 составляло $R_f \approx 0,2$ мОм [1,4]. Численная оценка тепловой энергии W_i , выделяющейся при проводимых высоковольтных экспериментах на высокоомном тонкостенном нихромовом диске используемого измерительного шунта типа ШК-300 [4], может быть выполнена по следующей приближенной формуле:

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

Из (11) при указанных исходных данных ($R_f \approx 0,2$ 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.

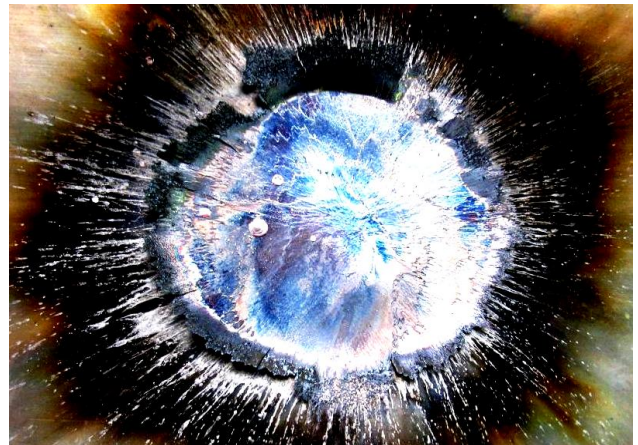


Рис. 3. Результаты электротермического воздействия нормированного аperiodического импульса тока искусственной молнии временной формы 15/315 мкс с амплитудой $I_{mL} \approx 184$ кА на опытный тонкостенный ($h=1$ мм) образец кровли ТО из нержавеющей стали марки 12X18H10T

Выполненные на высоковольтной высоковольтной установке ГИТМ-10/350 эксперименты показали, что измерительный коаксиальный шунт типа ШК-300 [4] разработки НИПКИ “Молния” НТУ “ХПИ” (отдел № 3 “Высоковольтной импульсной техники”) практически взрывообразного выделения в нем за счет явления электрического взрыва (ЭВ) металла его тонкостенного нихромового диска [15] такого количества тепловой энергии W_i не выдерживает. Проведенные экспериментальные опыты показали, что величина выделяю-

щейся на измерительном коаксиальном шунте ШК-300 [4] тепловой энергии W_i от протекания по нему аperiodического импульса тока искусственной молнии временной формы $T_1/T_2=15/315$ мкс не должна численно превышать значения, равного 0,5 кДж. Это значение тепловой энергии W_i соответствует III–IV уровням молниезащиты ТО, когда $I_{mL} \approx 100$ кА [5,19]. В рассматриваемом случае более общим показателем рассеиваемой высокоомным тонкостенным нихромовым диском измерительного коаксиального шунта ШК-300 тепловой энергии является предельно допустимая удельная энергия W_i/R_i , равная предельно допустимому интегралу действия импульса тока молнии J_{Li} и численно составляющая около $2,5 \cdot 10^6$ Дж/Ом.

На рис. 4 приведен внешний вид измерительного коаксиального шунта типа ШК-300 [4] как до, так и после протекания по нему в сильноточной разрядной цепи ГИТМ-10/350 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). Видно, что этот импульс тока короткого удара имитированной молнии приводит из-за ЭВ определенной части металла тонкостенного нихромового диска измерительного коаксиального шунта типа ШК-300 [4], сопровождающегося резким повышением давления внутри коаксиальной конструкции шунта, к его разрушению и выходу из строя.



Рис. 4. Общий вид измерительного коаксиального шунта типа ШК-300 до (слева) и после (справа) протекания через него в сильноточной разрядной цепи высоковольтного ГИТМ-10/350 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)

Из данных рис. 3 видно, что прямое воздействие на опытный листовый образец кровли ТО из нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т толщиной $h=1$ мм 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), 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 особенностью

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 12Х18Н10Т ($h=1$ 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.

1. Результаты выполненных в НИПКИ “Молния” НТУ “ХПИ” 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 12Х18Н10Т толщиной $h=1$ мм к прямому воздействию на них в воздухе нормированного по международному стандарту IEC 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 лишь локальному поверхностному термическому повреждению. При указанном действии импульсного тока короткого удара искусственного воздушного грозового разряда, удовлетворяющего требованиям I–IV уровней молниезащиты ТО, глубина h_m лунки приповерхностного проплавления стенки ($h=1$ мм) исследуемого стального покрытия не превышает 50 мкм, а ее максимальный радиус $r_0 = 30$ мм.

2. Установлено, что предельно допустимым уровнем тепловой энергии W_i , рассеиваемой измерительным коаксиальным шунтом ШК-300 с высокоомным тонкостенным нихромовым диском в сильноточной разрядной цепи высоковольтной электроустановки ГИТМ-10/350 с нормированным по международному стандарту IEC 62305-1-2010 аperiodическим импульсом тока искусственной молнии временной формы 15/315 мкс, является ее численное значение, не превышающее 0,5 кДж и соответствующее требованиям III–IV уровней молниезащиты ТО. Это предельно допустимое значение рассеиваемой указанным шунтом тепловой энергии W_i соответствует для него такому обобщенному показателю как удельная рассеиваемая им тепловая энергия, определяемая в виде W_i/R_i и численно равная предельно допустимому для его цепи с сопротивлением R_i интегралу действия импульса тока искусственной молнии $J_{Li} \approx 2,5 \cdot 10^6$ Дж/Ом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баранов М.И., Князев В.В., Кравченко В.И., Рудаков С.В. Результаты расчетно-экспериментальных исследований электротермической стойкости опытных образцов из листовой стали к воздействию нормированных компонент импульсного тока искусственной молнии // *Электротехника и электромеханика*. – 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., Колиушко Г.М., Кравченко В.И., Недзельский О.С., Дныщенко В.Н. Генератор тока искусственной молнии для натурных испытаний технических объектов // *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., Кужекин И.П., Ларионов В.П. Характеристики проплавления стенок металлических объектов при воздействии на них молнии // *Электричество*. – 1986. – №11. – С.22–27.
11. Баранов М.И. Приближенный расчет максимальной температуры плазмы в сильноточном канале искрового разряда высоковольтного воздушного коммутатора атмосферного давления // *Технічна електродинаміка*. – 2010. – №5. – С.18–21.
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., Колиушко Г.М., Кравченко В.И., Рудаков С.В. Мощный высоковольтный генератор аperiodических импульсов тока искусственной молнии с нормированными по международному стандарту IEC 62305-1-2010 амплитудно-временными параметрами // *Электротехника и электромеханика*. – 2015. – №1. – С.51–56.
20. Baranov M.I., Koliushko G.M., Kravchenko V.I., Rudakov S.V. 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 // *Instruments and Experimental Techniques*. – 2015. – Vol. 58. – No. 6. – pp.745–750.

REFERENCES

1. Baranov M.I., Kniatiev V.V., Kravchenko V.I., Rudakov S.V. Rezul'taty raschetno-eksperimental'nyh issledovaniy elektrotermicheskoy stojkosti opytnyh obrazcov iz listovoy stali k

vozdjstviju normirovannyh komponent impul'snogo toka iskusstvennoj molnii [The results of computational and experimental studies electrothermal resistance prototypes of sheet steel to the impact of standardized components of artificial lightning impulse current]. *Elektrotehnika i elektromehaniка–Electrical engineering & electromechanics*, 2016, no.3, pp.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. Baranov M.I., Koliushko G.M., Kravchenko V.I., Nedzelskiy O.S., Dnyshchenko V.N. Generator toka iskusstvennoj molnii dlja naturnyh ispytaniy tehnicheskikh ob'ektov [The current generator artificial lightning for full-scale tests of technical objects]. *Pribory i tehnika eksperimenta–Instruments and Experimental Technique*, 2008, no.3, pp.81–85.
5. IEC 62305-1: 2010. Protection against lightning. Part 1: General principles. Geneva, IEC Publ., 2010, pp. 1–72.
6. Lozanskiy E.D., Firsov O.B. Teoriya iskry [Theory of spark]. Moscow, Atomizdat Publ., 1975, 272 p.
7. Baranov M.I. Izbrannye voprosy elektrofiziki: Monografija v 2-h tomah. Tom 2, Kn. 2: Teoriya elektrofizicheskikh effektov i zadach [Selected topics of Electrophysics: Monograph in 2 volumes. Volume 2, Book 2: The theory of electrophysics effects and tasks]. Kharkiv, Point Publ., 2010, 407 p.
8. Rayzer Ju.P. Fizika gazovogo razrjada [Physics of gas charge]. Moscow, Nauka Publ., 1987, 592 p.
9. Kuzhekin I.P., Larionov V.P., Prohorov E.N. Molnija i molniezashchita [Lightning and protection from of ightning]. Moscow, Znak Publ., 2003, 330 p.
10. Abramov N.R., Kuzhekin I.P., Larionov V.P. Harakteristiki proplavlenija stенок metallicheskih ob'ektov pri vozdejstvii na nih molnii [Characteristics of penetration of the walls of metal objects when exposed to lightning]. *Elektrichestvo–Electricity*, 1986, no.11, pp.22–27.
11. Baranov M.I. Priblizhennyj raschet maksimal'noj temperatury plazmy v sil'notochnom kanale iskrovogo razrjada vysokovol'nogo vozdušnogo kommutatora atmosfernogo davlenija [An approximate calculation of the maximum temperature of the plasma in high-current high-voltage spark discharge channel switch air atmospheric pressure]. *Tehnichna elektrodinamika–Technical electrodynamicics*, 2010, no.5, pp.18–21.
12. Kuz'michev V.E. Zakony i formuly fiziki / Отв. ред. В.К. Tartakovskij [The laws and formulas of physics / Editor. Ed. V.E. Tartakovskij]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1989, 864 p.
13. http://www.sgkarkas.ru/spravochnik/marochnik_stalej/12h18n10t.
14. Baranov M.I. Izbrannye voprosy elektrofiziki: Monografija v 2-h tomah. Tom 3: Teoriya i praktika electrofizicheskikh zadach [Selected topics of Electrophysics: Monograph. Volume 3: Theory and practice of electrophysics tasks]. Kharkiv, Point Publ., 2014, 400 p.
15. Baranov M.I. Izbrannye voprosy elektrofiziki: Monografija v 2-h tomah. Tom 2, Kn. 1: Teoriya elektrofizicheskikh effektov i zadach [Selected topics electrophysics: monograph in 2 volumes. Vol. 2, Book 1: The theory of electrophysics effects and tasks]. Kharkiv, NTU “KhPI” Publ., 2009, 384 p.
16. Tehnika bol'shih impul'snyh tokov i magnitnyh polej / Pod red. V.S. Komel'kova [Technique large pulsed currents and magnetic fields / Ed. V.S. Komel'kov]. Moscow, Atomizdat Publ., 1970, 472 p.
17. Gulyy G.A. Nauchnye osnovy razrjadno-impul'snyh tehnologij [Scientific basis of the discharge-pulse technologies]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1990, 208 p.
18. Mesyats G.A. Impul'snaja energetika i elektronika [Pulsed power and elektronika]. Moscow, Nauka Publ., 2004, 704 p.

19. Baranov M.I., Koliushko G.M., Kravchenko V.I., Rudakov S.V. Moshhnyj vysokovol'nyj generator aperiodycheskih impul'sov toka iskusstvennoj molnii s normirovannymi po mezhdunarodnomu standartu IEC 62305-1-2010 amplitudno-vremennymi parametrami [Powerful high-voltage pulse generator aperiodic artificial lightning current to be normalized by the international standard IEC 62305-1-2010 amplitude-time parameters]. *Elektrotehnika i elektromehaniка-Electrical engineering & electromechanics*, 2015, no.1, pp.51-56.

20. Baranov M.I., Koliushko G.M., Kravchenko V.I., Rudakov S.V. 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. *Instruments and Experimental Techniques*, 2015, Vol. 58, no. 6, pp.745–750.

Надійшла (received) 29.08.2016

Баранов Михаил Иванович, д.т.н., с.н.с.,

Князев Владимир Владимирович, к.т.н., с.н.с.,

НИПКИ "Молния" Национального технического университета "Харьковский политехнический институт".

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

тел./phone +38 057 7076841, e-mail: eft@kpi.kharkov.ua

Рудаков Сергей Валерьевич, к.т.н., доц.,

Национальный университет гражданской защиты

Украины. 61023, г. Харьков, ул. Чернышевского, 94, НУГЗ Украины.

тел./phone +38 057 7073438, e-mail: serg_73@i.ua

M.I. Baranov, V.V. Kniaziev, S.V. Rudakov

Research & Design Institute "Molniya" National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", 47, Shevchenko Str., Kharkiv, 61013, Ukraine.

National University of Civil Protection of Ukraine, 94, Chernyshevskogo Str., Kharkiv, 61023, Ukraine.

Calculation and experimental estimation of results of electro-thermal action rationed on the international standard of IEC 62305-1-2010 impulse of current of short blow of artificial lightning on the thin-walled coverage from stainless steel.

Purpose. Calculation and experimental researches of electro-thermal resistibility of the pre-production thin-walled sheet models of outward roof of height technical buildings from stainless steel are easily soiled 12X18H10T to direct action on them rationed on the international standard of IEC 62305-1-2010 aperiodic impulse of current of short bow of artificial lightning of temporal form 10/350 μ s with the proper admittances on his peak-temporal parameters (PTP). **Methodology.**

Electrophysics bases of technique of high voltage and large impulsive currents (LIC), and also scientific and technical bases of planning of high-voltage impulsive devices and measuring methods in them LIC with followings below extreme PTP: amplitude of impulse of current of $I_{mL}=200$ kA (with admittance ± 10 %); integral of action of impulse of current of $J_L=10 \cdot 10^6$ A²·s (with admittance ± 35 %); duration of wavefront current of $T_1=10$ μ s (with admittance ± 20 %); time, proper amplitude of impulse of current of I_{mL} , $t_{mL} \leq 24$ μ s (with admittance ± 20 %); duration of flowing of impulse of current of $T_2=350$ μ s (with admittance ± 10 %). **Results.** The results of evaluation calculation and experimental researches of electro-thermal resistibility of the indicated pre-production sheet models are resulted measuring in the plan of 0,5 x 0,5 m from stainless steel are easily soiled the 12X18H10T thickness of 1 mm to action on them of aperiodic impulse of current of short blow of artificial lightning with rationed PTP on the requirements of international standard of IEC 62305-1-2010. In heavy-current experiments amplitude of I_{mL} of the aperiodic rationed impulse of current of artificial

lightning of temporal form of $T_1/T_2=15 \mu$ s/315 μ s changed in the range of (100-184) kA. The integral of action of J_L of impulse of current for I-IV of levels of protection of lightning of technical objects (TO) numeral made from $2,32 \cdot 10^6$ A²·s to $7,88 \cdot 10^6$ A²·s, and the flowing through the probed pre-production steel models electric charge of q_L numeral changed from 44,2 Kl to 81,3 Kl. It is rotined that direct influence rationed on the international standard of IEC 62305-1-2010 impulse of current of short blow of artificial lightning with in-use PTP on the indicated pre-production steel models causes in them the rounded small hole of melting of surface of coverage a depth no more than 50 μ m and diameter no more than 60 mm. The results of calculation and experiment coincide within the limits of 5 %. **Originality.** First in world practice on the unique generator of LIC of short blow of artificial lightning of type of GITM-10/350 experimental researches of electro-thermal resistibility of pre-production sheet models of outward roof are conducted TO of stainless steel 12X18H10T is easily soiled to direct action on them of impulses of current of an artificial storm air spark digit with extreme parameters. **Practical value.** Drawing on the got results in practice of protection height TO from linear lightning will allow substantially to promote their functional and fire-prevention safety in the conditions of direct action on them of the plasma ductings of heavy-current storm air spark discharge. References 20, figures 4, tables 1.

Keywords: 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, electro-thermal resistibility to lightning of pre-production models from stainless steel 12X18H10T.