

М.И. Баранов

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГРОЗОВОГО ОБЛАКА ТРОПОСФЕРЫ ЗЕМЛИ: ОСОБЕННОСТИ ИХ РАСЧЕТА И ПРИКЛАДНОГО ПРИМЕНЕНИЯ

*Приведені результати розрахункової оцінки основних енергетичних характеристик надвисоковольтної системи «грозова хмара-земля», що містить суцільну заряджену сферу хмари. У якості цих характеристик грозової хмари розглянуті: електричний заряд  $q_{\Sigma}$ , зосереджений в сферичній грозовій хмарі заданого об'єму з дрібнодисперсними зарядженнями включеннями у вигляді твердих діелектричних частинок з усередненою об'ємною щільністю; електричний потенціал  $\varphi_r$  в сферичному об'ємі грозової хмари заданого радіусу; електрична енергія  $W_0$ , яка накопичена в сферичному об'ємі прийнятої грозової хмари; амплітудно-часові параметри струму блискавки в плазмовому каналі довгого повітряного іскрового розряду грозової хмари на землю. Отримані результати сприятимуть можливості прогнозування грозової обстановки при мінімальній початковій метеорологічній інформації, подальшому розвитку природи атмосферної електрики, фізики лінійної блискавки і вирішенню глобальної проблеми блискавкозахисту об'єктів і обслуговування їх персоналу. Бібл. 12, рис. 2.*

*Ключові слова:* атмосферна електрика, грозова хмара, накопичений заряд, електричний потенціал і енергія хмари, струм в каналі розряду хмари на землю, розрахунок, експериментальні дані.

*Приведены результаты расчетной оценки основных энергетических характеристик сверхвысоковольтной системы «грозовое облако-земля», содержащей сплошную заряженную сферу облака. В качестве этих характеристик грозового облака рассмотрены: электрический заряд  $q_{\Sigma}$ , сосредоточенный в сферическом грозовом облаке заданного объема с мелкодисперсными заряженными включениями в виде твердых диэлектрических частиц с усредненной объемной плотностью; электрический потенциал  $\varphi_r$  в сферическом объеме грозового облака заданного радиуса; электрическая энергия  $W_0$ , накопленная в сферическом объеме принятого грозового облака; амплитудно-временные параметры тока молнии в плазменном канале длинного воздушного искрового разряда грозового облака на землю. Полученные результаты будут способствовать возможности прогнозирования грозовой обстановки при минимальной исходной метеорологической информации, дальнейшему развитию природы атмосферного электричества, физики линейной молнии и решению глобальной проблемы молниезащиты объектов и обслуживающего их персонала. Библиография 12, рис. 2.*

*Ключевые слова:* атмосферное электричество, грозовое облако, накопленный заряд, электрический потенциал и энергия облака, ток в канале разряда облака на землю, расчет, экспериментальные данные.

**Введение.** Одной из проблемных задач в области атмосферного электричества и молниезащиты наземных и находящихся в околоземном воздушном пространстве объектов до сих пор остается та, которая связана с определением при минимальной исходной информации о грозовой обстановке в исследуемом специалистами (инженерами и метеорологами) районе той или иной территории нашей планеты энергетических характеристик наблюдаемого ими грозового облака в тропосфере Земли. К подобным характеристикам грозового облака следует отнести: во-первых, накопленный в таком облаке суммарный электрический заряд  $q_{\Sigma}$ ; во-вторых, электрический потенциал  $\varphi_r$  в объеме грозового облака; в-третьих, электрическую энергию  $W_0$ , запасаемую мелкодисперсными включениями (например, мелкими каплями и парами воды; мелкими гранулами и кристаллами льда и мелкими твердыми диэлектрическими частицами [1, 2]) рассматриваемого атмосферного облака в электростатической системе «грозовое облако-земля»; в-четвертых, вероятные амплитудно-временные параметры (АВП) импульсного тока  $i_L(t)$  в канале высокоточного разряда грозового облака на землю или в защищаемый объект. От этих данных зависит их прогноз о возможной грозовой угрозе для наземных объектов и летательных аппаратов, оказавшихся в зоне расположения рассматриваемого атмосферного облака. Знание указанных энергетических характеристик грозового облака позволяет прогнозировать грозовую обстановку в исследуемом районе земной суши, а также определенным образом расширяет знания

людей в области атмосферного электричества и физики длинного воздушного искрового разряда (молнии) и последствий его (этого сильноточного разряда) действия на защищаемые объекты и окружающую их среду. Следует заметить, что обычно под грозовым облаком специалисты-метеорологи понимают кучево-дождевое облако, для которого выполняется ряд критических условий, указанных в [1]. Что касается понятия тропосферы Земли, то под ним понимают нижнюю часть земной атмосферы высотой до 11 км в умеренных широтах, в которой содержится 4/5 всей массы атмосферы, почти весь водяной пар и развиваются различные виды облаков [1, 3]. В этой связи приближенное определение расчетным путем величин  $q_{\Sigma}$ ,  $\varphi_r$ ,  $W_0$  и АВП разрядного тока  $i_L(t)$  в сверхвысоковольтной электростатической системе «грозовое облако-земля», в которой атмосферное облако имеет даже каноническую геометрическую форму и упрощенную внутреннюю «начинку» из ряда указанных выше мелкодисперсных включений, является актуальной в мире прикладной научно-технической задачей большой важности.

Целью статьи является выполнение расчетной оценки таких основных энергетических характеристик системы «грозовое облако-земля» как заряд  $q_{\Sigma}$ , потенциал  $\varphi_r$ , энергия  $W_0$  и амплитудно-временные параметры импульсного тока  $i_L(t)$  в канале длинного воздушного искрового разряда облака на землю.

**1. Постановка задачи.** Для удобства в выполнении анализа распределения в тропосфере Земли атмо-

© М.И. Баранов

сферного электричества рассмотрим один из частных случаев, когда грозовое облако имеет форму сферы радиусом  $R_0 \approx 985$  м (рис. 1), внутри которой с усредненной объемной плотностью  $N_0 \approx 5 \cdot 10^7$  м<sup>-3</sup> размещены главным образом твердые диэлектрические частицы радиусом  $r_0 \approx 10 \cdot 10^{-6}$  м [1], каждая из которых на стадии формирования кучево-дождевого облака получила за счет электризации в теплых восходящих воздушных потоках земной атмосферы отрицательный электрический заряд величиной  $q_0 \approx -2,78 \cdot 10^{-16}$  Кл и на стадии формирования грозового облака освободилась от покрывающих их электронейтральных молекулярных диполей воды [2]. Выбор указанного численного значения радиуса  $R_0$  облака был обусловлен тем, что для упрощения расчетов, как и в [2], его исходный расчетный объем  $V_0 \approx 4 \cdot 10^9$  м<sup>3</sup> представлял собой прямоугольную призму с размерами в горизонтальном основании 1000 м x 1000 м и высотой 4000 м, центр которой был расположен на высоте  $H_0 \approx 3000$  м над плоской поверхностью земли (см. рис. 1). Согласно [1] именно с подобных высот и начинается в земной тропосфере образование облачных зарядов. Исходя из того, что в принятом приближении  $V_0 = 4\pi R_0^3/3 = 4 \cdot 10^9$  м<sup>3</sup>, и вытекает указанное численное значение  $R_0$ . Что касается численных значений величин  $N_0$  и  $r_0$ , то они были выбраны нами на основании экспериментальных данных, приведенных в [1]. Расчетное определение в облаке указанного численного значения заряда  $q_0 \approx -2,78 \cdot 10^{-16}$  Кл твердых диэлектрических частиц радиусом  $r_0 \approx 10 \cdot 10^{-6}$  м было выполнено в [2] с учетом теории двойного электрического слоя, основы которой приведены в [1, 4]. Отдельные заряды  $q_0$  плотностью  $N_0$  определяют в облаке их усредненную объемную плотность  $\sigma_r \approx q_0 N_0 \approx -1,39 \cdot 10^{-8}$  Кл/м<sup>3</sup>, равномерно распределенную по его сферическому объему  $V_0$ . Пусть в воздушном промежутке системы «грозное облако-земля» выполняются нормальные атмосферные условия (давление воздуха составляет около  $1,013 \cdot 10^5$  Па, а его температура равна 0 °С [4]. Требуется с учетом принятых допущений в приближенном виде расчетным путем определить искомые значения накопленного принятым грозовым облаком суммарного заряда  $q_\Sigma$ , электрического потенциала  $\varphi_r$  в сферическом объеме грозового облака, его электрической энергии  $W_0$  и АВП импульсного тока  $i_L(t)$  разряда в электростатической системе «грозное облако-земля».

**2. Расчетная оценка электрического заряда  $q_\Sigma$  грозового облака.** С учетом указанных выше допущений на стадии формирования грозового облака, сопровождающейся «освобождением» его отдельных многочисленных зарядов  $q_0$  от электронейтральных молекулярных диполей воды [2], суммарный электрический заряд  $q_\Sigma$  рассматриваемого атмосферного облака может быть определен в следующем виде:

$$q_\Sigma = q_0 N_0 V_0. \quad (1)$$

Из (1) при принятых исходных данных, когда  $q_0 \approx -2,78 \cdot 10^{-16}$  Кл,  $N_0 \approx 5 \cdot 10^7$  м<sup>-3</sup> и  $V_0 \approx 4 \cdot 10^9$  м<sup>3</sup>, следует, что в рассматриваемом случае величина  $q_\Sigma \approx -55,6$  Кл.

Полученный по (1) модуль численного значения суммарного электрического заряда  $q_\Sigma \approx 55,6$  Кл в исследуемом грозовом облаке полностью соответствует

нормированному значению заряда  $q_L = (50 \pm 10)$  Кл для короткого удара молнии с импульсным разрядным аperiodическим током временной формы 10 мкс/350 мкс в наземные технические объекты, удовлетворяющие III-IV уровням молниезащиты по требованиям международного стандарта IEC 62305-1: 2010 [5, 6].

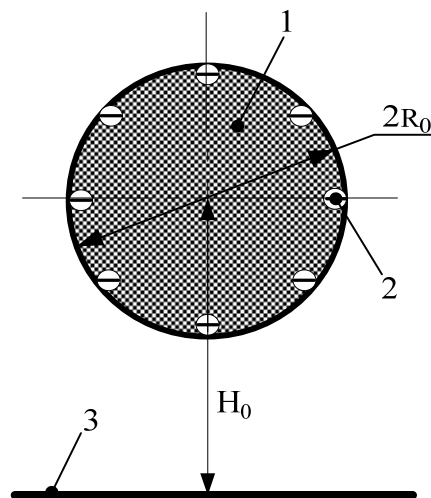


Рис. 1. Схематический вид упрощенной расчетной модели отрицательно заряженного грозового облака сферической формы, размещенного над земной плоской поверхностью (1 – облако; 2 – электрон; 3 – плоская поверхность Земли)

Кроме того, укажем, что используемое численное значение усредненной объемной плотности заряда исследуемого грозового облака, определяемое как  $\sigma_r \approx q_0 N_0 \approx -1,39 \cdot 10^{-8}$  Кл/м<sup>3</sup>, соответствует известным экспериментальным данным для среднего значения плотности объемного заряда в грозовом облаке [1, 2].

**3. Расчетная оценка электрического потенциала  $\varphi_r$  грозового облака.** Применяя для нахождения в облаке величины электрического потенциала  $\varphi_r$  подход, приведенный в [7], для радиального распределения искомого потенциала  $\varphi_r$  в исследуемой упрощенной модели грозового облака получаем:

$$\varphi_r = q_\Sigma (3R_0^2 - r^2) / (8\pi\epsilon_0 R_0^3), \quad (2)$$

где  $r$  – текущий радиус в сферическом объеме облака;  $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$  Ф/м – электрическая постоянная [4].

Из (2) при  $r=0$  для электрического потенциала  $\varphi_r = \varphi_0$  в центре принятого грозового облака находим:

$$\varphi_0 = 3q_\Sigma / (8\pi\epsilon_0 R_0). \quad (3)$$

При  $r=R_0$  из (2) для электрического потенциала  $\varphi_r = \varphi_R$  на наружной поверхности сферы грозового облака вытекает следующее расчетное соотношение:

$$\varphi_R = q_\Sigma / (4\pi\epsilon_0 R_0). \quad (4)$$

Анализ приведенных расчетных выражений (3) и (4) показывает, что в центре рассматриваемого грозового облака электрический потенциал  $\varphi_0$  в 1,5 раза превышает электрический потенциал  $\varphi_R$ , приобретаемый наружной сферической поверхностью облака. Отсюда становится физически более понятным в теории атмосферного электричества глубинный механизм зарядной «подпитки» плазменного канала длинного искрового разряда грозового облака на землю или защищаемый технический объект. Ведь при таком радиальном распределении в грозовом облаке

электрического потенциала  $\varphi_r$  при электрическом пробое в системе «грозовое облако-земля» (см. рис. 1) воздушного промежутка длиной  $(H_0 - R_0)$  для компенсации убьли электрического потенциала  $\varphi_R$  на наружной поверхности облака к ней из внутренних зон облака с более высоким электрическим потенциалом  $\varphi_r$  будут «подтекать» электрические заряды (в нашем случае свободные электроны), пополняющие носители электрического тока  $i_L(t)$  в канале самого разряда.

Численная оценка по (3) и (4) электрических потенциалов внутри и снаружи рассматриваемого грозового облака при  $q_\Sigma \approx -55,6$  Кл и  $R_0 \approx 985$  м свидетельствует о том, что в этом случае искомые величины по модулю становятся примерно равными  $\varphi_0 \approx 759$  МВ, а  $\varphi_R \approx 506$  МВ. Из известных автору на сегодня количественных данных для электрического потенциала  $\varphi_r$  грозового облака можно указать лишь его численное значение примерно в 100 МВ, приведенное в [8].

Для проверки достоверности полученного значения электрического потенциала  $\varphi_R \approx 506$  МВ рассматриваемого грозового облака воспользуемся численной оценкой значения напряженности  $E_R$  электростатического поля вблизи его наружной сферической поверхности ( $r \approx R_0$ ). С одной стороны,  $E_R \approx \varphi_R / R_0 \approx 513$  кВ/м [4]. С другой стороны, для нахождения в исследуемом электростатическом случае  $E_R$  применим более точное аналитическое соотношение, имеющее вид [2, 7]:

$$E_R = q_\Sigma / (4\pi\epsilon_0 R_0^2). \quad (5)$$

Из (5) при  $q_\Sigma \approx 55,6$  Кл и  $R_0 \approx 985$  м получаем, что  $E_R \approx 515$  кВ/м. Видно, что оба приведенные для  $E_R$  численные значения практически совпадают. В этой связи можно говорить о работоспособности расчетных соотношений (1) и (4), определяющих суммарный заряд  $q_\Sigma$  в принятой модели грозового облака и электрический потенциал  $\varphi_R$  наружной сферической поверхности исследуемого облака. Кстати, значение  $E_R$  по (5) оказывается наибольшим в радиальном распределении напряженности электростатического поля в сферическом объеме  $V_0$  облака. Как известно, для этого сильного  $E$ -поля согласно соотношению вида [2, 7]:

$$E_r = q_\Sigma r / (4\pi\epsilon_0 R_0^3), \quad (6)$$

при  $r = 0$  напряженность  $E_r$  будет равной нулю (при  $r = R_0$  формула (6) переходит в (5) и определяет уровень  $E$ -поля на наружной поверхности этого облака).

Приведенные данные для радиального распределения напряженности  $E_r$  электростатического поля в системе «грозовое облако-земля» однозначно указывают на то, что в случае однородного (однородного по составу [3]) характера изменения носителей электричества в сферическом объеме  $V_0$  принятого грозового облака развитие электронных лавин [1, 8], являющихся предвестником появления в рассматриваемой нами системе молнии (искрового пробоя в тропосфере Земли длинного воздушного промежутка), будет всегда начинаться с наружной поверхности облака. Отметим, что указанное численное значение  $E_R \approx 515$  кВ/м при принятых атмосферных условиях приближается к критическому значению  $E$ -поля, соответствующему предпробивной стадии процессов в длинном воздушном промежутке длиной  $(H_0 - R_0)$  нашей системы [1, 8].

**4. Расчетная оценка электрической энергии  $W_0$  грозового облака.** Предварительные расчетные оценки численных значений величины электрической энергии  $W_0$ , запасаемой в исследуемом грозовом облаке, выявили наличие ряд особенностей в ее определении. Так, оказалось, что прямое применение к расчетной системе «грозовое облако-земля» (см. рис. 1) положений и формул из [9] для ее электрической емкости приводит к ошибочным результатам в вычислении значений энергии  $W_0$  грозового облака. Для демонстрации получаемых результатов применительно к энергии  $W_0$  при таком расчетном подходе будем вначале исходить из того, что при найденном выше (в разделе 3) значении по (4) электрического потенциала  $\varphi_R$  облака и априори нулевом электрическом потенциале земли ( $\varphi_E = 0$ ) нам при расчете электрической энергии  $W_0$  для используемой расчетной системы «грозовое облако-земля» остается определить лишь значение ее электрической емкости. «Лобовое» определение в рассматриваемом случае ( $H_0/R_0 \approx 3,04$ ) ее электрической емкости  $C_0$ , по рекомендуемой [9] для неравенства  $H_0/R_0 > 1,5$  приближенной формуле вида:

$$C_0 = 2\pi\epsilon_0 / \ln(2H_0 / R_0), \quad (7)$$

приводит к существенно заниженным значениям электрической емкости в расчетной системе «грозовое облако-земля». Например, при принятых исходных данных  $H_0 \approx 3000$  м и  $R_0 \approx 985$  м согласно (7) величина  $C_0$  оказывается равной примерно  $C_0 \approx 30,8 \cdot 10^{-12}$  Ф. Поэтому величина  $W_0 \approx C_0 U_0^2 / 2$  [4], где  $U_0 = (\varphi_R - \varphi_E)$  – разность электрических потенциалов грозового облака и плоской поверхности земли, принимает при  $U_0 \approx 506$  МВ и используемом нами огромном объеме  $V_0 \approx 4 \cdot 10^9$  м<sup>3</sup> грозового облака численное значение, составляющее всего 3,94 МДж. Причиной тому является то, что формула (7) учитывает только распределение электрического заряда по наружной поверхности расчетной сферы радиусом  $R_0$ . Она не учитывает влияния электрического заряда, распределенного с объемной плотностью  $\sigma_V \approx q_0 N_0$  по объему  $V_0 = 4\pi R_0^3 / 3$  данной сферы. В этой связи величину электрической энергии  $W_0$  грозового облака рекомендуется определять по следующему приближенному соотношению:

$$W_0 \approx 0,5 C_E U_0^2, \quad (8)$$

где  $C_E \approx q_\Sigma / U_0$  – эквивалентная емкость сверхвысоковольтной системы «грозовое облако-земля».

Следует заметить, что при использовании формулы (8) в приближенный расчет величин  $C_E$  и  $W_0$  также вносится определенная погрешность, обусловленная описанным нами ранее соответствующим радиальным распределением электрического потенциала  $\varphi_r$  по сферическому объему принятого грозового облака. Однако, эта погрешность несоизмерима мала по сравнению с погрешностью, вносимой формулой (7) в расчет электрической емкости и электрической энергии  $W_0$  в нашей системе «грозовое облако-земля».

Из (8) при  $q_\Sigma \approx -55,6$  Кл и  $U_0 \approx -506$  МВ находим, что при рекомендуемом авторском подходе для рассматриваемой системы «грозовое облако-земля» величина ее эквивалентной электрической емкости  $C_E$  будет принимать численное значение около  $1,1 \cdot 10^{-7}$  Ф, а величина запасаемой в ней электрической энергии

$W_0 \approx 14,1 \cdot 10^9$  Дж (как видим, почти в 3578 раз больше, чем с применением формулы (7) при расчете  $C_0$  и  $W_0$ ). Количественными данными для  $W_0$  других исследователей атмосферного электричества в мире автор в настоящее время не располагает. Можно только предполагать, что если значения величин суммарного заряда  $q_\Sigma$  по (1) и электрического потенциала  $\varphi_R$  по (4) найдены правильно (этим расчетам нами были выше даны соответствующие достаточно убедительные электрофизические обоснования), то и приближенное определение по (8) значения электрической энергии  $W_0$  грозового облака является также правильным.

**5. Расчетная оценка АВП тока  $i_L(t)$  в канале разряда грозового облака на землю.** Для этой оценки применительно к цепи разряда емкости  $C_E$  грозового облака через плазменный канал в воздухе на землю используем классический электротехнический подход, характерный для электромагнитных процессов в  $RLC$  – цепи [10]. Вначале оценим численное значение индуктивности  $L_k$  цилиндрического плазменного канала радиусом  $r_k$  сильнооточного искрового разряда грозового облака в воздушном промежутке длиной  $l_k \approx (H_0 - R_0)$  на землю по следующей формуле [11]:

$$L_k = (2\pi)^{-1} \mu_0 l_k [\ln(2l_k / r_k) - 1], \quad (9)$$

где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнитная постоянная [4].

Из (9) при  $l_k \approx (H_0 - R_0) \approx 2015$  м и  $r_k \approx 11 \cdot 10^{-3}$  м [12] следует, что в нашем случае сосредоточенная индуктивность  $L_k$  канала искрового разряда грозового облака на землю будет принимать значение, численно равное около 4,76 мГн. При оценке численного значения активного сопротивления  $R_k$  цилиндрического канала грозового воздушного разряда будем исходить из того, что погонное активное сопротивление  $R_{k0}$  исследуемого сильнооточного канала согласно расчетно-экспериментальным данным из [12] для повторной импульсной  $D$ -компоненты тока искусственной молнии амплитудой  $I_{mD} \approx 92,3$  кА (рис. 2, где  $t_{mD} \approx 15$  мкс – время, соответствующее первой амплитуде  $I_{mD}$  тока) численно составляет около 0,92 Ом/м. В результате для активного сопротивления  $R_k$  плазменного канала грозового разряда исследуемого облака на землю (см. рис. 1) находим, что  $R_k \approx R_{k0} \cdot l_k \approx 0,92 \text{ Ом} \cdot \text{м}^{-1} \times 2015 \text{ м} \approx 1,85$  кОм. Видно, что в исследуемом случае для электрических параметров  $R_k$ ,  $L_k$  и  $C_E$  рассматриваемой разрядной цепи выполняется неравенство вида  $R_k > 2(L_k/C_E)^{1/2}$ . Значит, в канале тока молнии будет протекать апериодический импульс тока  $i_L(t)$  [10, 12].

Для АВП тока  $i_L(t)$  разряда при апериодическом законе его изменения во времени  $t$  можно воспользоваться следующим расчетным соотношением [10, 12]:

$$i_L(t) = U_0 [(\alpha_2 - \alpha_1)L_k]^{-1} [\exp(-\alpha_1 t) - \exp(-\alpha_2 t)], \quad (10)$$

где  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  – коэффициенты формы импульсного тока, равные  $\alpha_1 = \delta - (\delta^2 - \omega_0^2)^{1/2}$  и  $\alpha_2 = \delta + (\delta^2 - \omega_0^2)^{1/2}$ ;  $\delta = R_k / (2L_k)$  – коэффициент затухания тока разряда;  $\omega_0 = (L_k C_E)^{-1/2}$  – собственная круговая частота разрядного тока облака.

Время  $t_{mL}$ , соответствующее амплитуде  $I_{mL}$  грозового тока разряда по (10), будет равно известному в электротехнике аналитическому соотношению [10]:

$$t_{mL} = \ln(\alpha_2 / \alpha_1) / (\alpha_2 - \alpha_1). \quad (11)$$

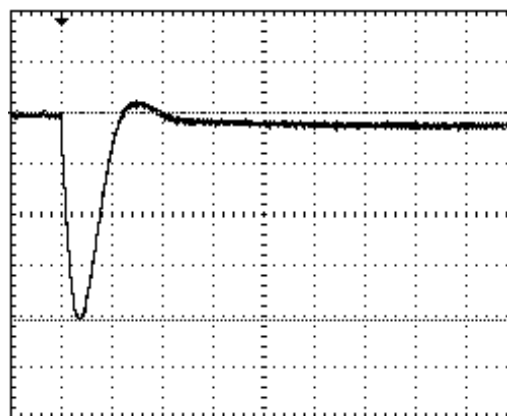


Рис. 2. Типичная осциллограмма  $D$ -компоненты тока искусственной молнии ( $I_{mD} \approx 92,3$  кА;  $t_{mD} \approx 15$  мкс; масштаб по вертикали – 22,52 кА/клетка; масштаб по горизонтали – 50 мкс/клетка), полученная в сильнооточной разрядной цепи высоковольтного генератора тока молнии УИТОМ-1 [12]

Для найденных исходных данных  $R_k \approx 1,85$  кОм,  $L_k \approx 4,76$  мГн и  $C_E \approx 110$  нФ получаем, что в рассматриваемом случае:  $\delta \approx 1,94 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$ ;  $\omega_0 \approx 43,7 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$ ;  $\alpha_1 \approx 5 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$ ;  $\alpha_2 \approx 3,83 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$ ;  $t_{mL} \approx 11,47$  мкс (см. рис. 2, где опытное время для амплитуды импульса тока искусственной молнии составляло около 15 мкс). При  $U_0 \approx 506$  МВ и  $t_{mL} \approx 11,47$  мкс расчетное значение амплитуды тока молнии для исследуемого случая согласно (10) будет составлять примерно  $I_{mL} \approx 262,1$  кА. Полученные количественные значения для  $t_{mL}$  и амплитуды  $I_{mL}$  тока в канале разряда принятого грозового облака на землю хорошо коррелируют с АВП импульсного тока, характерными для коротких ударов линейной молнии в наземные объекты, удовлетворяющие I уровню их молниезащиты по жестким требованиям международного стандарта IEC 62305-1: 2010 [5, 6]. Что касается длительности  $\tau_p$  апериодического импульса тока молнии на уровне  $0,5I_{mL}$ , то она для нашего случая оказывается примерно равной  $\tau_p \approx 0,7R_k C_E \approx 142,4$  мкс. Таким образом, при минимальной информации об электромагнитной обстановке в зоне формирования и развития грозового облака (только по его ориентировочным габаритным размерам и высоте размещения над поверхностью земли) специалистам можно вполне аргументировано прогнозировать грозовую «картину» для рассматриваемой сверхвысоковольтной электрофизической системы «грозовое облако-земля».

#### Выводы.

1. Показано, что в качестве упрощенной расчетной модели грозового облака инженерами и метеорологами может быть принята сферическая модель облака наружным радиусом  $R_0$  и объемом  $V_0 = 4\pi R_0^3 / 3$ , содержащая распределенные по ее сферическому объему с усредненной плотностью  $N_0 \approx 5 \cdot 10^7 \text{ м}^{-3}$  отрицательно наэлектризованные в теплых восходящих воздушных потоках тропосферы Земли мелкие твердые диэлектрические частицы радиусом  $r_0 \approx 10 \cdot 10^{-6}$  м и зарядом  $q_0 \approx -2,78 \cdot 10^{-16}$  Кл. Варьируя численными значениями радиуса  $R_0$  и соответственно объема  $V_0$  такого грозового облака, можно изменять и его основные энергетические характеристики в широких пределах, соответствующих действующим в мире нормативно-техническим документам.

2. На примере рассмотрения грозового облака земной тропосферы радиусом  $R_0 \approx 985$  м и объемом  $V_0 \approx 4 \cdot 10^9$  м<sup>3</sup> при  $H_0 \approx 3000$  м продемонстрированы возможности предложенного подхода в области изучения атмосферного электричества для приближенного определения специалистами модулей его таких энергетических характеристик как суммарный электрический заряд  $q_{\Sigma} \approx 55,6$  Кл, электрический потенциал в центре  $\varphi_0 \approx 759$  МВ и на наружной поверхности  $\varphi_R \approx 506$  МВ облака, запасаемая мелкодисперсными включениями облака электрическая энергия  $W_0 \approx 14,1$  ГДж и АВП аperiodического импульса тока  $i_L(t)$  в плазменном канале длинного воздушного искрового разряда облака на землю ( $I_{mL} \approx 262,1$  кА;  $t_{mL} \approx 11,5$  мкс;  $\tau_p \approx 142,4$  мкс). Полученные количественные данные для  $q_{\Sigma}$ ,  $\varphi_R$ ,  $W_0$  и АВП импульсного тока грозового разряда на поверхность земли удовлетворяют ряду требований международного стандарта IEC 62305-1: 2010 для коротких ударов линейной молнии в наземные объекты.

3. Полученные результаты будут способствовать возможному выполнению инженерами и метеорологами прогнозирования электромагнитной обстановки в районе формирования и развития в тропосфере Земли реального грозового облака, предварительно приведенного по величине занимаемого им объема  $V_0$  к эквивалентному грозовому облаку сферической формы радиусом  $R_0$ . Такой подход благодаря разработанному физико-математическому аппарату позволяет в приближенном виде найти указанные основные энергетические характеристики ( $q_{\Sigma}$ ,  $\varphi_R$ ,  $W_0$  и АВП канального тока) эквивалентного грозового облака и открывает определенные новые возможности в мировой практике решения актуальных задач молниезащиты наземных объектов и находящихся в полете летательных аппаратов, оказавшихся в опасной зоне сильного электромагнитного воздействия на их электроаппаратуру (прежде всего, на их слаботочную электронику) грозового облака с его колоссальными по численным показателям энергетическими характеристиками.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бортник И.М., Белогловский А.А., Верещагин И.П., Вершинин Ю.Н., Калинин А.В., Кучинский Г.С., Ларионов В.П., Монастырский А.Е., Орлов А.В., Темников А.Г., Пинталь Ю.С., Сергеев Ю.Г., Соколова М.В. Электрофизические основы техники высоких напряжений: Учебник для ВУЗов / Под общей ред. проф. И.П. Верещагина. – М.: Издательский дом МЭИ. – 2010. – 704 с.
2. Баранов М.И. Новая гипотеза и электрофизическая природа дополнительных механизмов возникновения, накопления и разделения электрических зарядов в атмосферных облаках Земли // Электротехника і електромеханіка. – 2018. – №1. – С. 46-53. doi: 10.20998/2074-272X.2018.1.07.
3. Большой иллюстрированный словарь иностранных слов. – М.: Русские словари, 2004. – 957 с.
4. Кузьмичев В.Е. Законы и формулы физики / Отв. ред. В.К. Тартаковский. – К.: Наукова думка, 1989. – 864 с.
5. IEC 62305-1: 2010 «Protection against lightning. Part 1: General principles». Geneva, IEC Publ., 2010.
6. Baranov M.I., Koliushko G.M., Kravchenko V.I., Rudakov S.V. A generator of aperiodic current pulses of artificial lightning with a rationed temporal form of  $10 \mu\text{s}/350 \mu\text{s}$  with an amplitude of  $\pm(100-200)$  kA. *Instruments and Experimental Techniques*, 2015, vol.58, no.6, pp. 745-750. doi: 10.1134/s0020441215060032.

ning with a rationed temporal form of  $10 \mu\text{s}/350 \mu\text{s}$  with an amplitude of  $\pm(100-200)$  kA // *Instruments and Experimental Techniques*. – 2015. – vol.58. – no.6. – pp. 745-750. doi: 10.1134/s0020441215060032.

7. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике. – М.: Наука, 1990. – 624 с.
8. Бржезицкий В.О., Білий І.В., Бойко М.І., Гуль В.І., Гурин А.Г., Ільєнко О.С., Ісакова А.В., Кондра Б.М., Копшин В.О., Кравченко В.І., Набока Б.Г., Проценко О.Р., Рудаков В.В., Хименко Л.Т., Хомініч В.І., Шостак В.О., Янішевський В.І. Техніка і електрофізика високих напруг: Навчальний посібник / За ред. В.О. Бржезицького, В.М. Михайлова. – Харків: Торнадо, 2005. – 930 с.
9. Иоссель Ю.Я., Кочанов Э.С., Струнский М.Г. Расчет электрической емкости. – Л.: Энергоиздат. – 1981. – 288 с.
10. Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники: В 2-х т. Учебник для вузов. Том 1. – Л.: Энергоиздат, 1981. – 536 с.
11. Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля. – М.: Мир, 1972. – 391 с.
12. Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики: Монография. Том 3: Теория и практика электрофизических задач. – Харьков: Точка, 2014. – 400 с.

#### REFERENCES

1. Bortnik I.M., Beloglovskiy A.A., Vereshchagin I.P., Ver-shinin Yu.N., Kalinin A.V., Kuchinskiy G.S., Larionov V.P., Monastyrskiy A.E., Orlov A.V., Temnikov A.G., Pinal' Yu.S., Sergeev Yu.G., Sokolova M.V. *Elektrofizicheskie osnovy tekhniki vysokih naprjzhenij* [Electrophysics bases of technique of high voltage]. Moscow, Publishing house of MEI, 2010. 704 p. (Rus).
2. Baranov M.I. New hypothesis and electrophysics nature of additional mechanisms of origin, accumulation and division of electric charges in the atmospheric clouds of Earth. *Electrical engineering & electromechanics*, 2018, no.1, pp. 46-53. doi: 10.20998/2074-272X.2018.1.07.
3. *Bol'shoy illjustrirovannyj slovar' inostrannyh slov* [Large illustrated dictionary of foreign words]. Moscow, Russkie slovari Publ., 2004. 957 p. (Rus).
4. Kuz'michev V.E. *Zakony i formuly fiziki* [Laws and formulas of physics]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1989. 864 p. (Rus).
5. IEC 62305-1: 2010 «Protection against lightning. Part 1: General principles». Geneva, IEC Publ., 2010.
6. Baranov M.I., Koliushko G.M., Kravchenko V.I., Rudakov S.V. A generator of aperiodic current pulses of artificial lightning with a rationed temporal form of  $10 \mu\text{s}/350 \mu\text{s}$  with an amplitude of  $\pm(100-200)$  kA. *Instruments and Experimental Techniques*, 2015, vol.58, no.6, pp. 745-750. doi: 10.1134/s0020441215060032.
7. Javorskij B.M., Detlaf A.A. *Spravochnik po fizike* [Handbook of physics]. Moscow, Nauka Publ., 1990. 624 p. (Rus).
8. Brzhezitskiy V.A., Bilyy I.V., Boyko N.I., Gul' V.I., Gurin A.G., Il'enko O.S., Isakova A.V., Kondra B.M., Kopshin V.A., Kravchenko V.I., Naboka B.G., Protsenko O.R., Rudakov V.V., Khimenko L.T., Khominich V.I., Shostak V.A., Yanishevskiy V.I. *Tehnika i elektrofizika vysokih naprjzhenij* [Technics and Electrophysics of High Voltages]. Kharkiv, Tornado Publ., 2005. 930 p. (Ukr).
9. Iosssel' Yu.Ya., Kochanov E.S., Strunskiy M.G. *Raschet elektricheskoy emkosti* [Calculation of electric capacity]. Leningrad, Energoizdat Publ., 1981. 288 p. (Rus).
10. Neyman L.R., Demirchyan K.S. *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki. V 2-kh t. T. 1* [Theoretical bases of electrical engineering. In 2 vols. Vol. 1]. Leningrad, Energoizdat Publ., 1981, p. 536. (Rus).

11. Knopfel' G. *Sverkhsil'nye impul'snye magnitnye polia* [Ultra strong pulsed magnetic fields]. Moscow, Mir Publ., 1972. 391 p. (Rus).

12. Baranov M.I. *Izbrannye voprosy elektrofiziki. Tom 3: Teoriya i praktika elektrofizicheskikh zadach* [Selected topics of Electrophysics. Vol. 3: Theory and practice of electrophysics tasks]. Kharkiv, Tochka Publ., 2014. 400 p. (Rus).

Поступила (received) 19.02.2018

Баранов Михаил Иванович, д.т.н., гл.н.с.,  
НИПКИ «Молния»  
Национальный технический университет  
«Харьковский политехнический институт»,  
61013, Харьков, ул. Шевченко, 47,  
тел/phone +38 057 7076841,  
e-mail: baranovmi@kpi.kharkov.ua

M.I. Baranov

Scientific-&-Research Planning-&-Design Institute «Molniya»,  
National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,  
47, Shevchenko Str., Kharkiv, 61013, Ukraine.

#### **Power descriptions of a storm cloud of troposphere of Earth: features of their calculation and applied utilization.**

**Purpose.** Implementation of calculation estimation of such basic power descriptions of the system is a «storm cloud - earth», as total charge of  $q_{\Sigma}$ , electric potential of  $\phi_r$ , electric energy of  $W_0$  and amplitude-temporal parameters (ATP) of pulse current  $i_L(t)$  in the channel of a long air spark discharge of cloud on earth.

**Methodology.** Electrophysics bases of technique of high voltages and large currents, theoretical bases of the electrical engineering, theoretical electrophysics, theory of the electromagnetic field and technique of the strong electric and magnetic fields. **Results.** The results of calculation estimation of basic power descriptions are resulted in the overhigh voltage electrophysics calculation system a «storm cloud – earth». To such descriptions of a storm cloud behave: total electric charge of  $q_{\Sigma}$ , concentrated in a storm cloud of spherical form of the set volume with the shallow dispersible negatively charged including as particulate dielectric matters the set by an middle

closeness; electric potential of  $\phi_r$ , is in the spherical volume of a storm cloud of the set size; electric energy of  $W_0$ , accumulated in the spherical volume of a storm cloud of the set radius of  $R_0$ ; PTP (amplitude of  $I_{mL}$  and duration of  $\tau_p$  at level  $0.5I_{mL}$ ) of aperiodic impulse of current  $i_L(t)$  of linear lightning in the plasma channel of a long air spark digit of a storm cloud on earth. The ground of possibility of the use is given in close practical calculations in place of the real storm cloud of the simplified calculation model of a storm cloud, containing the spherical volume of  $V_0$  by the radius of  $R_0$  is shown that at  $R_0 \approx 985$  m and accordingly  $V_0 \approx 4 \cdot 10^9$  m<sup>3</sup> in the examined model of a storm cloud his indicated power descriptions arrive at the followings numeral values: charge of  $q_{\Sigma} \approx -55.6$  C, potential on the outward surface of cloud of  $\phi_R \approx -506$  MV, electric energy of  $W_0 \approx 14.1$  GJ in a cloud and amplitude of aperiodic impulse of current of  $I_{mL} \approx -262.1$  kA at duration of his flowing  $\tau_p \approx 142.4$   $\mu$ s in the plasma channel of a long air spark digit of cloud on earth. This calculation information well correlates with the known experimental information, characteristic for the short shots of lightning in surface objects. The receive results will be instrumental in possibility of prognostication of a sticky storm wicket specialists at presence of only minimum initial information about a storm cloud in earthly troposphere. **Originality.** First at the analysis of a storm situation in troposphere of Earth offered approach, related to bringing the real storm cloud over the volume of  $V_0$  to an equivalent on volume spherical storm cloud by the radius of  $R_0$ , for which will apply the physical and mathematical vehicle of analysis of flowings in him electrophysics processes developed an author. **Practical value.** Application of the in practice calculation findings will allow to deepen scientific and technical knowledge in area of nature of atmospheric electricity, will be instrumental in further development of physics of linear lightning and successful decision of global problem of protecting from lightning of surface objects and auxiliary them personnel. References 12, figures 2.

**Key words:** atmospheric electricity, storm cloud, accumulated charge, electric potential and energy of cloud, current in the channel of discharge of cloud on earth, calculation, experimental information.