

М.И. БАРАНОВ**РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА ОСНОВНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГРОЗОВОГО ОБЛАКА ТРОПОСФЕРЫ ЗЕМЛИ**

Приведены результаты приближенного определения для упрощенной расчетной модели грозового облака сферической формы заданным внешним радиусом R_0 электрической энергии W_0 , запасаемой в его объеме V_0 с мелкодисперсными заряженными включениями, и амплитуды I_{mL} импульсного разрядного тока в системе «грозовое облако-земля». Принятая расчетная модель грозового облака базируется на электризации в теплых восходящих воздушных потоках мелких твердых диэлектрических частиц радиусом r_0 и объемной плотностью N_0 , поступающих в атмосферу с поверхности земли и с дымовыми выбросами промышленных предприятий. Показано, что в исследуемой модели грозового облака при $R_0 \approx 985$ м ($V_0 \approx 4 \cdot 10^9$ м³) электрический потенциал его наружной поверхности может достигать $\varphi_0 \approx 506$ МВ, запасаемая электрическая энергия $W_0 \approx 14,1$ ГДж, а амплитуда аperiodического импульса тока в плазменном канале длинного воздушного искрового разряда на землю $I_{mL} \approx 272,9$ кА.

Ключевые слова: тропосфера Земли, грозовое облако, электрическая энергия облака, сила тока при разряде грозового облака на землю.

М.І. БАРАНОВ**РОЗРАХУНКОВА ОЦІНКА ОСНОВНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГРОЗОВОЇ ХМАРИ ТРОПОСФЕРИ ЗЕМЛІ**

Приведені результати наближеного визначення для спрощеної розрахункової моделі грозової хмари сферичної форми заданим зовнішнім радіусом R_0 електричної енергії W_0 , що запасається в його об'ємі V_0 з дрібнодисперсними зарядженими включеннями, і амплітуди I_{mL} імпульсного розрядного струму в системі «грозова хмара-земля». Прийнята розрахункова модель грозової хмари базується на електризації в теплих висхідних повітряних потоках дрібних твердих діелектричних частинок радіусом r_0 і об'ємною щільністю N_0 , що поступають в атмосферу з поверхні землі і з димовими викидами промислових підприємств. Показано, що в досліджуваній моделі грозової хмари при $R_0 \approx 985$ м ($V_0 \approx 4 \cdot 10^9$ м³) електричний потенціал його зовнішньої поверхні може досягати $\varphi_0 \approx 506$ МВ, електрична енергія $W_0 \approx 14,1$ ГДж, що запасається, а амплітуда аperiodичного імпульсу струму в плазмовому каналі довгого повітряного іскрового розряду на землю $I_{mL} \approx 272,9$ кА.

Ключові слова: тропосфера Землі, грозова хмара, електрична енергія хмари, сила струму при розряді грозової хмари на землю.

M.I. BARANOV**CALCULATION ESTIMATION OF BASIC POWER DESCRIPTIONS OF A STORM CLOUD OF TROPOSPHERE OF EARTH**

The results of close determination are resulted for the simplified calculation model of a storm cloud of spherical form by the set external radius of R_0 of electric energy of W_0 , stocked in his volume of V_0 with the shallow dispersible charged including, and amplitude of I_{mL} of impulsive bit current in the system a «storm cloud-earth». The accepted calculation model of a storm cloud is based on electrization in the warm ascending currents of air of shallow particulate dielectric matters the radius of r_0 and by a volume closeness of N_0 , entering atmosphere from a terrene and with the smoke extras of industrial enterprises. It is rotined that in the probed model of a storm cloud at $R_0 \approx 985$ m ($V_0 \approx 4 \cdot 10^9$ m³) electric potential of his outward surface can arrive at $\varphi_0 \approx 506$ MV, stocked electric energy of $W_0 \approx 14,1$ GJ, and amplitude of aperiodic impulse of current in the plasma channel of a long air spark digit on earth of $I_{mL} \approx 272,9$ kA.

Key words: troposphere of Earth, storm cloud, electric energy of cloud, strength of current at the discharge of a storm cloud on earth.

Введение. Несмотря на достаточно высокий уровень развития в настоящее время электрофизических основ техники высоких напряжений, до сих пор одной из проблемных задач в области атмосферного электричества остается та, которая связана с определением основных энергетических характеристик грозового облака тропосферы Земли [1]. К таким характеристикам следует отнести электрическую энергию W_0 , запасаемую подобным атмосферным облаком в скоплении внутри себя заряженных мелкодисперсных включений (сферических капель и паров воды, мелких кристаллов

льда и твердых диэлектрических частиц), и импульсный электрический ток i_L его длинного искрового разряда в объекты, находящиеся на земной поверхности. Заметим, что под грозовым облаком специалисты-метеорологи понимают кучево-дождевое облако, для которого выполняется ряд критических условий, сформулированных 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 облака

[1,2]. Знание указанных энергетических характеристик грозового облака позволяет хоть как-то прогнозировать грозовую обстановку в том или ином районе нашей планеты, а также расширяет знания людей в области атмосферного электричества и физики длинного воздушного искрового разряда – молнии. В этой связи практическая апробация приближенных расчетных соотношений для определения величин W_0 и i_L применительно к грозовому облаку той или иной геометрической формы и внутренней «начинки» является актуальной прикладной научно-технической задачей.

Целью статьи является выполнение на основании известных в технике и электрофизике высоких напряжений и больших токов аналитических зависимостей расчетной оценки запасаемой в грозовом облаке упрощенной структуры и конфигурации электрической энергии и канального тока при его длинном воздушном искровом разряде в земную плоскую поверхность.

1. Постановка задачи. Рассмотрим тот частный случай, когда грозовое облако имеет форму сплошной сферы радиусом $R_0 \approx 985$ м (рис. 1), внутри которой с усредненной объемной плотностью $N_0 \approx 5 \cdot 10^7$ м⁻³ 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 [3]. Выбор указанного численного значения радиуса R_0 облака был обусловлен тем, что для упрощения расчетов его исходный расчетный объем $V_0 \approx 4 \cdot 10^9$ м³ 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 таких высот и начинается в тропосфере образование облачных зарядов. Исходя из того, что в принятом приближении $V_0 = 4\pi R_0^3/3 = 4 \cdot 10^9$ м³ и вытекает указанное численное значение R_0 . Что касается численных значений величин N_0 и r_0 , то они были выбраны 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 [3] с учетом теории двойного электрического слоя, основы которой приведены в [1,4]. Отдельные заряды q_0 плотностью N_0 определяют в рассматриваемом случае их усредненную объемную плотность $\sigma_V \approx q_0 N_0 \approx 1,39 \cdot 10^{-8}$ Кл/м³, распределенную по сфере грозового облака. Пусть в воздушном промежутке системы «грозовое 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 при-

ближенном виде расчетным путем определить искомые значения накопленной принятым грозовым облаком электрической энергии W_0 и амплитуды I_{mL} импульсного разрядного тока в системе «грозовое облако-земля».

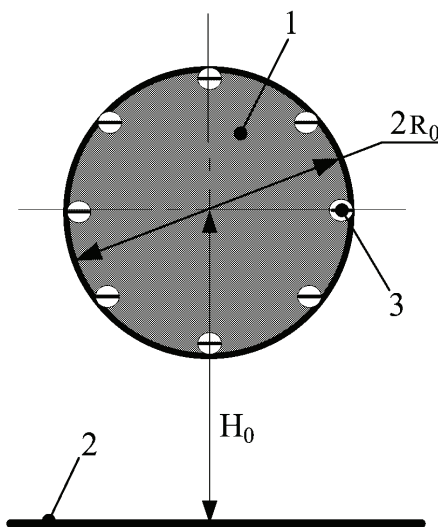


Рисунок 1 – Упрощенный вид отрицательно заряженного грозового облака сферической формы, размещенного над земной поверхностью:

1 – облако; 2 – поверхность земли; 3 – электрон

2. Расчетная оценка электрической энергии W_0 , запасенной в грозовом облаке. Данную расчетную оценку величины W_0 выполним первоначально на основании классического подхода (вариант расчета № 1), использующего следующее известное в электротехнике и электрофизике аналитическое соотношение [4]:

$$W_0 = 0,5 C_0 U_0^2, \quad (1)$$

где C_0 – электрическая емкость в системе «грозовое облако-земля»; U_0 – разность электрических потенциалов грозового облака и плоской поверхности земли.

С учетом того, что в рассматриваемом случае количественно выполняется равенство вида $H_0/R_0 \approx 3,04$ (как видим, численно больше 1,5), то для нахождения величины C_0 может быть использовано следующее известное в электростатике расчетное соотношение [5]:

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

где $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная [4].

Так как электрический потенциал φ_E поверхности земли в исследуемом случае в первом приближении можно принять равным нулю, то для определения в (1) величины U_0 требуется найти лишь значение электрического потенциала φ_0 наружной сферической поверхности исследуемого атмосферного облака. Для этого предварительно найдем суммарный электрический заряд $q_{\Sigma 0}$, находящийся в сферической области радиусом R_0 , занимаемой принятым грозовым облаком, в виде $q_{\Sigma 0} \approx \sigma_V V_0 \approx 55,6$ Кл. Тогда для искомого электрического потенциала φ_0 на наружной поверхности сферы грозового облака (при ее текущем радиусе $r = R_0$), внутри которой равномерно по объему распре-

делены заряды q_0 твердых диэлектрических частиц радиусом $r_0 \approx 10 \cdot 10^{-6}$ м, можно записать следующее расчетное выражение [6]:

$$\varphi_0 = q_{\Sigma 0} / (4\pi\epsilon_0 R_0). \quad (3)$$

Из (3) при $q_{\Sigma 0} \approx 55,6$ Кл и $R_0 \approx 985$ м получаем, что на внешней границе принятой расчетной модели грозового облака электрический потенциал принимает численное значение, равное около $\varphi_0 \approx 506$ МВ. В этой связи величина U_0 при используемых допущениях оказывается также численно равной примерно 506 МВ. С учетом (2) при $H_0 \approx 3000$ м и $R_0 \approx 985$ м для емкости в системе «грозовое облако-земля» следует, что $C_0 \approx 30,8 \cdot 10^{-12}$ Ф. В результате из (1) при $C_0 \approx 30,8 \cdot 10^{-12}$ Ф и $U_0 \approx 506 \cdot 10^6$ В находим, что запасаемая электрическая энергия в заряженной сфере грозового облака будет численно составлять достаточно малое значение, равное всего около 3,94 МДж. Одной из причин тому является, на мой взгляд, некорректное определение по (2) величины электрической емкости C_0 для электрически заряженного по всему сферическому объему V_0 грозового облака. Расчетная формула (2) учитывает только определенный незначительный по своей величине электрический заряд, распределенный лишь по наружной сферической поверхности принятого нами грозового облака. Отсюда, видимо, и появляется значительная погрешность в нахождении величины W_0 по приведенному выше варианту расчета №1, не учитывающему объемный характер суммарного заряда $q_{\Sigma 0}$ исследуемого атмосферного облака.

Далее при оценке величины W_0 остановимся на варианте расчета № 2, в котором учитывается суммарный электрический заряд $q_{\Sigma 0}$ рассматриваемого грозового облака. Для этого в (1) под величиной емкости C_0 рассматриваемой системы «грозовое облако-земля» будем понимать эквивалентную электрическую емкость C_{0E} заряженной по всему объему сферы грозового облака, которую следует определять из выражения вида [5]:

$$C_{0E} = q_{\Sigma 0} / U_0. \quad (4)$$

Из (4) при $q_{\Sigma 0} \approx 55,6$ Кл и $U_0 \approx 506 \cdot 10^6$ В получаем, что в этом случае искомая величина эквивалентной емкости C_{0E} принимает численное значение, равное примерно $1,1 \cdot 10^{-7}$ Ф. Тогда для величины $W_0 = 0,5 C_{0E} U_0^2$ при $C_{0E} \approx 110$ нФ и $U_0 \approx 506$ МВ находим, что запасаемая в исследуемом упрощенном грозовом облаке электрическая энергия численно составляет около $14,1 \cdot 10^9$ Дж.

Одной из возможных проверок достоверности приведенных выше расчетных данных (например, для численного значения $U_0 \approx 506 \cdot 10^6$ В) может служить то, что величина напряженности E_R электрического поля вблизи наружной сферической поверхности рассматриваемого грозового облака, определенная из приближенного соотношения вида $E_R \approx U_0 / R_0$ [4], при $U_0 \approx 506$ МВ и $R_0 \approx 985$ м будет численно равной примерно 513 кВ/м. В тоже время величина E_R , найденная из известного в электростатике более точного соотношения вида [6]

$$E_R = q_{\Sigma 0} / (4\pi\epsilon_0 R_0^2), \quad (5)$$

при $q_{\Sigma 0} \approx 55,6$ Кл и $R_0 \approx 985$ м оказывается равной около 515 кВ/м. Видно, что оба приведенные количественные результаты для E_R практически совпадают. Кроме того, найденное расчетным путем численное значение суммарного электрического заряда $q_{\Sigma 0} \approx 55,6$ Кл в исследуемом грозовом облаке соответствует нормированному значению заряда $q_L = (50 \pm 10)$ Кл для короткого удара молнии с разрядным аперийодическим током временной формы 10 мкс/350 мкс в наземные объекты, удовлетворяющие III-IV уровням молниезащиты по требованиям международного стандарта IEC 62305-1: 2010 [7,8].

3. Расчетная оценка амплитуды тока I_{mL} в канале разряда грозового облака на поверхность земли. Предварительно оценим численное значение индуктивности L_k цилиндрического плазменного канала радиусом r_k искрового разряда грозового облака в воздушном промежутке длиной $l_k \approx (H_0 - R_0)$ на землю по следующей известной в электрофизике формуле [9]:

$$L_k = (2\pi)^{-1} \mu_0 l_k [\ln(2l_k / r_k) - 1], \quad (6)$$

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

Из (6) при $l_k \approx (H_0 - R_0) \approx 2015$ м и $r_k \approx 10 \cdot 10^{-3}$ м [10] вытекает, что в рассматриваемом случае сосредоточенная индуктивность L_k канала искрового разряда будет принимать численное значение, равное примерно 4,79 мГн. При определении активного сопротивления R_k плазменного канала грозового воздушного разряда будем исходить из того, что погонное активное сопротивление R_{k0} исследуемого сильноточного канала согласно расчетно-экспериментальным данным из [10] 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. Тогда для активного сопротивления R_k плазменного канала длинного искрового разряда рассматриваемого грозового облака в землю находим, что $R_k \approx R_{k0} l_k \approx 0,92$ Ом·м⁻¹ × 2015 м ≈ 1,85 кОм. Из полученных численных результатов для параметров R_k , L_k и C_{0E} следует, что $R_k > 2(L_k / C_{0E})^{1/2}$ [4, 9].

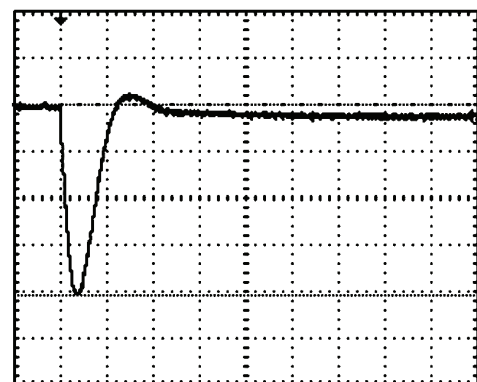


Рисунок 2 – Типичная оциллограмма D -компоненты тока искусственной молнии ($I_{mD} \approx -92,3$ кА; $t_{mD} \approx 15$ мкс; масштаб по вертикали – 22,52 кВ/клетка; масштаб по горизонтали – 50 мкс/клетка), полученная в сильноточной разрядной цепи высоковольтного генератора тока молнии типа УИТОМ-1 [10]

С учетом выполнения в сильноточной цепи длинного воздушного разряда на землю исследуемого грозового облака указанного соотношения для ее параметров R_k , L_k и C_{0E} в плазменном канале воздушного искрового разряда будет протекать аperiodический импульс тока молнии длительностью τ_p примерно 142,4 мкс на уровне $0,5I_{mL}$ ($\tau_p \approx 0,7R_kC_{0E}$). В этой связи искомую величину амплитуды I_{mL} импульсного разряда тока в системе «грозовое облако-земля» определяем из соотношения:

$$I_{mL} \approx U_0 / R_k. \quad (7)$$

Из (7) при $U_0 \approx 506$ МВ и $R_k \approx 1,85$ кОм находим, что для выбранной расчетной модели грозового облака численное значение амплитуды I_{mL} тока в канале молнии составляет около 272,9 кА. Полученное нами количественное значение I_{mL} хорошо коррелирует с максимальными значениями импульсного тока, характерными для коротких ударов молнии в наземные объекты [7,8].

Выводы.

1. На примере упрощенной расчетной модели грозового облака сферической формы наружным радиусом $R_0 \approx 985$ м и объемом $V_0 \approx 4 \cdot 10^9$ м³, базирующейся на распределении с усредненной плотностью $N_0 \approx 5 \cdot 10^7$ м⁻³ по объему облака отрицательно наэлектризованных в теплых восходящих воздушных потоках твердых диэлектрических частиц радиусом $r_0 \approx 10 \cdot 10^{-6}$ м и зарядом $q_0 \approx 2,78 \cdot 10^{-16}$ Кл, предложены приближенные соотношения для количественной оценки электрической энергии W_0 , запасаемой в таком грозовом облаке, и наибольшей амплитуды I_{mL} импульсного тока в сильноточном плазменном канале длинного воздушного искрового разряда этого атмосферного облака на землю. Несмотря на принятые упрощения при выборе указанной расчетной модели грозового облака, представленный подход с использованием в составе облака лишь заряженных за счет электризации в воздушной атмосфере мелких сферических диэлектрических частиц и электронейтральных молекулярных диполей воды носит достаточно обобщенный характер и отражает основные электрофизические процессы и механизмы, протекающие в подобных облаках земной тропосферы при формировании ими предгрозовой и грозовой обстановок в различных регионах нашей планеты.

2. Полученные результаты будут способствовать возможному выполнению отечественными электрофизиками и метеорологами лишь по визуально определяемому в приближенном виде ими внешним (габаритным) размерам грозового облака (только по занимаемому этим облаком ориентировочному объему V_0) прогнозных количественных оценок для таких энергетических характеристик наблюдаемого ими грозового облака как запасаемая в нем электрическая энергия W_0 и наибольшая сила импульсного тока I_{mL} при его длинном воздушном искровом сильноточном разряде в объекты, размещенные на поверхности земли.

3. Учитывая определенную простоту научно-технического изложения автором достаточно сложно-

го материала электрофизической направленности, связанного с физикой возникновения и формирования в земной тропосфере грозового облака и его дальнейшим поражающим (разрушающим) электротермическим и электродинамическим воздействием на наземные объекты и окружающую их среду, приведенные данные позволяют инженерно-техническому персоналу электроэнергетического профиля на ответственных технических объектах самостоятельно осуществлять оценку возможной угрозы для их объектов сформировавшегося в зоне их размещения того или иного грозового облака.

Список литературы:

1. Бортник И.М. Электрофизические основы техники высоких напряжений: Учебник для ВУЗов / И.М. Бортник, А.А. Белогловский, И.П. Вережцагин, Ю.Н. Вершинин, А.В. Калинин, Г.С. Кучинский, В.П. Ларионов, А.Е. Монастырский, А.В. Орлов, А.Г. Темников, Ю.С. Пинтал, Ю.Г. Сергеев, М.В. Соколова. – Под общей ред. проф. И.П. Вережцагина. – М.: Издательский дом МЭИ, 2010. – 704 с.
2. Большой иллюстрированный словарь иностранных слов. – М.: Русские словари, 2004. – 957 с.
3. Баранов М.И. Новая гипотеза и электрофизическая природа дополнительных механизмов возникновения, накопления и разделения электрических зарядов в атмосферных облаках Земли / М.И. Баранов // Электротехника і електромеханіка. – 2018.– №1.– С. 46-53. – DOI: 10.20998/2074-272X.2018.1.07.
4. Кузьмичев В.Е. Законы и формулы физики / В.Е. Кузьмичев. – Отв. ред. В.К. Тартаковский. – К.: Наукова думка, 1989. – 864 с.
5. Иосель Ю.Я. Расчет электрической емкости / Ю.Я. Иосель, Э.С. Кочанов, М.Г. Струнский. – Л.: Энергоиздат, 1981. – 288 с.
6. Яворский Б.М. Справочник по физике / Б.М. Яворский, А.А. Детлаф. – М.: Наука, 1990. – 624 с.
7. IEC 62305-1: 2010. Protection against lightning. Part 1: General principles. – Geneva: IEC Publ. 2010. pp. 1-72.
8. 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. – P. 745-750. – DOI: 10.1134/S0020441215060032.
9. Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля / Г. Кнопфель. – Пер. с англ. Ф.А. Николаева, Ю.П. Свириденко. – М.: Мир, 1972. – 391 с.
10. Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики. Монография в 3-х томах. Том 3: Теория и практика электрофизических задач / М.И. Баранов. – Х.: Точка, 2014. – 400 с.

Bibliography (transliterated):

1. Bortnik I.M., Beloglovskiy A.A., Vereshchagin I.P., Verшинin 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 napryazhenij: Uchebnik dlya VUZov. Pod obshchej red. prof. I.P. Vereshchagina [Electrophysics bases of technique of high voltage: Textbook for Institutes of higher / Under general ed. prof. I.P. Vereshchagin]. Moscow, Publishing house of MEI, 2010, 704 p.
2. Bol'shoj illjustrirovannyj slovar' inostrannyh slov [Large illustrated dictionary of foreign words]. Moscow, Russian dictionaries Publ., 2004, 957 p.
3. Baranov M.I. Novaja gipoteza i elektrofizicheskaya priroda

dopolnitel'nyh mehanizmov vznikoveniya, nakopleniya i razdeleniya elektricheskikh zaryadov v atmosferynykh oblakah Zemli [New hypothesis and electrophysics nature of additional mechanisms of origin, accumulation and division of electric charges in the atmospheric clouds of Earth]. *Elektrotehnika i elektromekhanika-Electrical engineering & electromechanics*, 2018, no.1, pp.46-53. DOI: 10.20998/2074-272X.2018.1.07.

4. Kuz'michev V.E. *Zakony i formuly fiziki / Otv. red. V.K. Tartakovskiy* [The laws and formulas of physics / Editor. Ed. V.K. Tartakovskiy]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1989, 864 p.

5. Iossel' Yu.Ya., Kochanov E.S., Strunskiy M.G. *Raschet elektricheskoy emkosti* [Calculation of electric capacity]. Leningrad, Publ. Energoizdat, 1981, 288 p.

6. Jaworskiy B.M., Detlaf A.A. *Spravochnik po fizike* [Handbook of physics]. Moscow, Nauka Publ., 1990, 624 p.

7. IEC 62305-1: 2010. Protection against lightning. Part 1: General principles. Geneva, IEC Publ. 2010, pp. 1–72.

8. 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. *Pribory i Tehnika Eksperimenta-Instruments and Experimental Techniques*, 2015, Vol. 58, no.6, pp.745–750. DOI: 10.1134/S0020441215060032.

9. Knopfel H. *Sverhsil'nye impul'snye magnitnye polja / Per. s eng. Ph.A. Nikolaeva, Yu.P. Sviridenko* [Superstrong pulsed magnetic fields / Trans. from eng. Ph.A. Nikolaev, Yu.P. Sviridenko]. Moscow, Mir Publ., 1972, 391 p.

10. Baranov M.I. *Izbrannye voprosy elektrofiziki: Monografiya v 3-h tomah. Tom 3: Teoriya i praktika electrofizicheskikh zadach* [Selected topics of electrophysics: Monograph in 3-th volumes. Vol. 3: Theory and practice of electrophysics tasks]. Kharkiv, Point Publ., 2014, 400 p.

Поступила (received) 12.03.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Баранов Михайло Іванович (Baranov Michail Ivanovich) – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, головний науковий співробітник Науково-дослідного та проектно-конструкторського інституту «Молнія» НТУ «ХП», м. Харків; тел.: (057) 707-68-41; e-mail: baranovmi@kpi.kharkov.ua.