

УДК 621.316.98: 22.193

ВОЗМОЖНЫЙ ПОДХОД ДЛЯ ОЦЕНКИ СИСТЕМ МОЛНИЕЗАЩИТ РАКЕТ-НОСИТЕЛЕЙ НА КОСМОДРОМАХ

© 2012 А.Н. Потапенко¹, В. Курей², Т.А. Потапенко¹

¹ Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

² Уппсальский университет, Уппсала, Швеция

Поступила в редакцию 07.12.2012

Представлены особенности численного решения задач для исследования распределённых систем молниезащит на стартовых площадках с возможностью определения исследуемого поля на основе потенциала и электрической функции потока. Выполнены численные расчёты с представлением основных результатов для исследуемых объектов.

Ключевые слова: система молниезащиты, математическая модель, численные расчёты, электростатические поля

В работе [1] предложена классификация математических моделей для исследования разряда молнии. За основу классификации приняты виды исходных уравнений: 1) газодинамические (гидродинамические) модели для исследования начального развивающегося канала, приводящего к появлению ударной волны; 2) электродинамические модели на основе уравнений Максвелла для исследования основных эффектов при разряде молнии; 3) математические модели, представляющие разряд молнии в виде переходного процесса в линии передачи с распределёнными электрическими параметрами R , L , C на единицу длины; 4) инженерные математические модели на основе, например, уравнений, связывающих ток в молниевом канале относительно высоты и времени с током в начале канала. За исключением газодинамической модели последние три типа математических моделей для исследования разряда молнии подробно представлены в обзорной работе [2]. Следует отметить математические модели, использующие цепи с распределёнными параметрами для исследования особенностей обратного разряда молнии [3], а также развитие этих моделей на основе модифицированного телеграфного уравнения [4] с учётом распределённых источников тока для исследования тонких эффектов в разрядном канале молнии.

Пример особенностей математического моделирования развития канала при мощном электрическом разряде в жидкости, находящейся в полузакнутой цилиндрической камере с полусферической верхней частью, представлен в [5]. В этой работе исследовано: 1) появление ударной волны при расширении разрядного канала; 2) гидродинамические эффекты взаимодействия созданных прямых и отражённых ударных волн с учётом

стенок камеры. Результаты численных расчётов в 3-х мерном пространстве позволили объяснить известные экспериментальные данные о концентрации ударных волн, образующихся при мощном электрическом разряде в жидкости [6], причём они принципиально отличны от [7], трактующей процессы на основе эмпирических зависимостей. В дальнейшем эти процессы дополнительно исследовались в [8] с применением метода инверсии для полубесконечных областей (МИПО).

Для определения электромагнитных полей молнии в [2] показаны существующие основные подходы: 1) на основе численных решений точных уравнений с помощью специализированных алгоритмов; 2) численных решений уравнений Максвелла на базе, например, метода конечных разностей во временной области (finite-difference time-domain method – FDTD); 3) с использованием упрощённых уравнений. Отмечается, что если ранее FDTD использовался для анализа перенапряжений, индуцированных в линиях передач разрядом молнии, то в настоящее время применяется для анализа электромагнитных полей молнии.

В целом представленные в обзоре [2] математические модели – это в настоящее время основные модели для исследования разряда молнии и её различных физических проявлений, однако для оценки и сравнительного анализа существующих важных технических решений, например, в виде систем молниезащит ракет-носителей на космодромах [9], необходимы разработки дополнительных математических моделей.

Постановка задачи. Схема расположения типичной системы молниезащиты из 4-х молниеприёмников (рис. 1) для ракет-носителей с космическими аппаратами характерна для стран США (космодром на мысе Канаверал, Флорида), Франции, Индии и др. [9]. Для упрощения исследований представим систему молниезащиты ракеты-носителя в виде башен с металлическими стержнями на их вершинах (например, не учитываются тросы, расположенные на вершинах стержней молниезащиты по контуру, особенности этих стержней, их материал и др.). Устройство 5 (рис.

Потапенко Анатолий Николаевич, кандидат технических наук, профессор кафедры электротехники и автоматики. E-mail: potapenko@intbel.ru

Курей Вернон, профессор Уппсальского университета, Уппсала, Швеция

E-mail: Vernon.Coaray@angstrom.uu.se

Потапенко Татьяна Анатольевна, аспирантка. E-mail: ttwiggy@rambler.ru

1), связанное с ракетой-носителем на старте, представляется в виде металлической фермы, например, как на стартовой площадке №40 космодрома на мысе Канаверал для ракет-носителей типа «Falcon 9» для запуска космических аппаратов SpaceX Dragon.

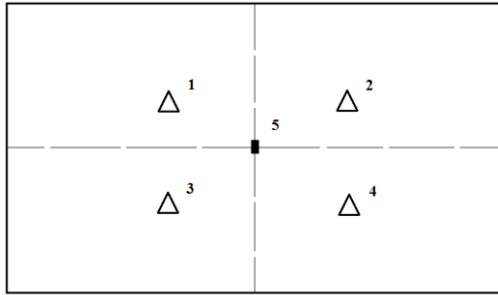


Рис. 1. Схема типичной системы молниезащиты на космодроме: 1 – 4 – башни с цилиндрическими стержнями; 5 – ферма

При математическом моделировании системы молниезащиты на стартовой площадке применяется схема, показанная на рис. 2. Для учёта влияния дистанции l_1 от металлической фермы 5 до башни со стержнем 1 исследования проводятся в вертикальной диагональной плоскости от 1-ой до 4-ой башни. Границы области $B(x,y)$ следующие: G_1 – плоскость в виде поверхности земли $F(x,y)$; G_2 – нижняя граница облака $V(x,y)$ в виде плоскости относительно поверхности $F(x,y)$; G_3, G_4 – границы для искусственного ограничения расчетной области путём введения в постановку задачи граничного условия типа $\partial\psi/\partial n=0$, так как в этой задаче не учитывается краевой эффект от $V(x,y)$.

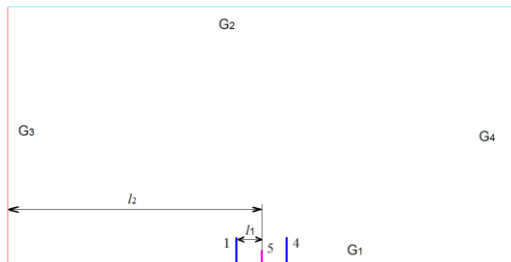


Рис. 2. Схема моделирования области $B(x,y)$ системы молниезащиты на космодроме (цифровые обозначения как на рис. 1)

В [10, 11] было проведено сравнение результатов расчета внешней краевой задачи с учётом краевого эффекта от облака и заземлённого стержня на основе МИПО с данными [12] в вертикальной плоскости по распределению поля ψ . В [12] решалась задача определения поля потенциала ψ , и также были введены облако и стержень, но внешняя краевая задача была сведена к внутренней на основе условия $\partial\psi/\partial n=0$. Погрешность была незначительная для исследуемой части области, при этом в [11] были показаны особенности исследуемого краевого эффекта. В связи с этим исходные данные для расчёта следующие: 1) расстояние от металлической фермы 5 до границы G_3 считается l_2

= 1000 м; 2) высота от $F(x,y)$ до нижней границы $V(x,y)$ принимается $H_1 = 1000$ м; 3) высота башней со стержнями считается $H_2 = 100$ м; 4) высота металлической фермы принимается $H_3 = 50$ м; 5) дистанция $l_1 = var$.

Для представления особенностей плоского или плоскопараллельного электростатического не-обходимо определить эквипотенциальные поверхности с шагом $\Delta\psi = const$ и поверхности электрической функции потока μ с шагом $\Delta\mu = const$ [13]. Как и потенциал ψ функция μ является относительной характеристикой поля, причём физический смысл имеет только разность её значений например, в точках p, d и не зависит от формы кривой и определяется в виде:

$$\mu_p - \mu_d = \int_d^p E_n dl. \quad (1)$$

Здесь E_n – проекция напряженности поля по нормали к кривой.

Следует заметить, что вектор напряженности поля E направлен по касательной к силовой линии (поверхности), поэтому линейный поток напряженности поля через любой отрезок силовой линии равен нулю. В связи с этим точки силовой линии характеризуются одним значением функции потока, причём каждая силовая линия в плоскопараллельном поле – это линия (поверхность) функции потока μ с уравнением вида

$$\mu_i = const. \quad (2)$$

Приращение потенциала $d\psi$ на длине dn связано зависимостью

$$d\psi = - E_k dn. \quad (3)$$

Здесь знак « \leftarrow » означает, что падение ψ происходит в направлении силовой линии. По определению функции потока её приращение $d\mu$ на длине dl равно

$$d\mu = E_k dl. \quad (4)$$

С учётом зависимостей (3), (4) величина E может определяться в виде

$$E_k = - d\psi / dn \text{ и } E_k = d\mu / dl. \quad (5)$$

Следовательно, напряженность поля равна падению потенциала на единицу длины в направлении силовой линии или увеличению функции потока на единицу длины в направлении эквипотенциальной линии. Эти соотношения необходимы при решении задачи о распределении μ . Для оценки и сравнительного анализа существующих технических решений систем молниезащит ракет-носителей на стартовых площадках предлагается решение задачи в два этапа.

Первый этап. Определяется поле распределения потенциала ψ на основе решения уравнения Лапласа в виде

$$\square \partial^2 \psi / \partial x^2 + \partial^2 \psi / \partial y^2; (x,y) \in B(x,y). \quad (6)$$

Граничные условия задачи с учётом рис. 2 следующие:

- на границе G_1 :

$$\psi(x,y)=0, (x,y) \in G_1; \quad (7)$$

- на границах башен со стержнями 1 (G_{11}), 4 (G_{14}) и на металлической ферме 5 (G_{15}) заземлённых относительно $F(x,y)$:

$$\psi(x,y)=0, (x,y) \in G_{11}, G_{14}, G_{15}; \quad (8)$$

- на границах G_3, G_4 :

$$\partial\psi/\partial n=0, (x,y) \in G_3, G_4; \quad (9)$$

- на границе G_2 :

$$\psi(x,y)=\psi_0, (x,y) \in G_2; \quad (10)$$

где $B(x,y)$ – исследуемая область, ограниченная $G_1 - G_4, G_{11}, G_{14}, G_{15}$.

Считаем, что на G_2 потенциал равен ψ_0 при возникновении электрических полей в атмосфере. При этом исследуется электростатическое поле при условии, что внешнее поле, прикладываемое к объектам 1-5, существенно мало, т.е. подразумевается отсутствие объёмных электрических зарядов в атмосфере исследуемой области $B(x,y)$. При решении задачи определяются поле ψ и эквипотенциальные поверхности $\psi_i=const$ с некоторым шагом $\Delta\psi=const$. Затем относительно высоты H_1 на основе расчётов этого этапа выделяется некоторая область $D(x,y)$ до уровня H_4 относительно поверхности $F(x,y)$ с учётом симметрии в области $B(x,y)$ относительно 5.

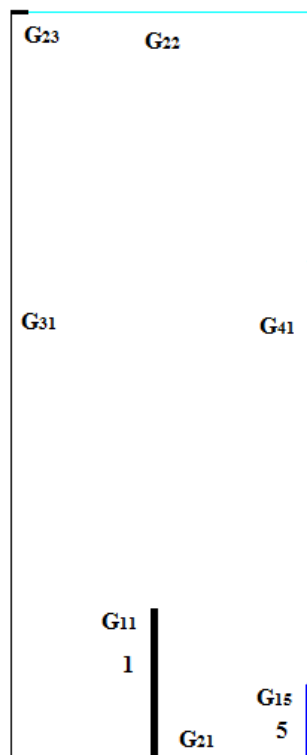


Рис. 3. Схема моделирования области $D(x,y)$ системы молниезащиты (цифровые обозначения как на рис. 1)

Особенность выбора $D(x,y)$ следующая: 1) на уровне H_4 поверхность $\psi_k=const$ должна быть параллельна границе G_2 , чтобы было исключено влияние системы молниезащиты на распределение напряженности поля на этом уровне; 2) H_4 должна превышать max высоту H_2 объектов 1 – 4 системы молниезащиты.

Второй этап. Схема моделирования области $D(x,y)$ системы молниезащиты на космодроме, показана на рис. 3. Границы исследуемой области $D(x,y)$ следующие: G_{21} – граница в виде части G_1 ; G_{22} – граница на уровне H_4 в виде некоторой поверхности $\psi_k = const$; G_{31} – граница в виде части G_3 ; G_{41} – граница в виде части симметрии области $B(x,y)$, проходящая через объект 5; G_{11}, G_{15} – границы соответствующие области $B(x,y)$.

Исходные данные для расчёта следующие: 1) расстояние от металлической фермы 5 до границы G_{31} считается $l_3 = 200$ м; 2) высота от $F(x,y)$ до поверхности $\psi_k=const$ равна H_4 (будет определена после расчетов первого этапа); 3) высота башни со стержнем $H_2=100$ м; 4) высота металлической фермы $H_3=50$ м; 5) дистанция $l_1=var$. Поле распределения электрической функции потока μ определяется из эллиптического уравнения аналогичному уравнению Лапласа:

$$\square \partial^2 \mu / \partial x^2 + \partial^2 \mu / \partial y^2; (x,y) \in D(x,y). \quad (11)$$

Граничные условия задачи с учётом рис. 3 следующие:

- на границе G_{21} :

$$\partial\mu/\partial n=0, (x,y) \in G_{21}; \quad (12)$$

- на границах башни со стержнем 1 (G_{11}) и на металлической ферме 5 (G_{15}):

$$\partial\mu/\partial n=0, (x,y) \in G_{11}, G_{15}; \quad (13)$$

- на границе G_{31} :

$$\mu(x,y)=\mu_0, (x,y) \in G_{31}; \quad (14)$$

- на границе G_{41} :

$$\mu(x,y)=0, (x,y) \in G_{41}; \quad (15)$$

- на границе G_{22} :

$$\mu(x,y)=0, (x,y) \in G_{22}; \quad (16)$$

где $D(x,y)$ – исследуемая область, ограниченная $G_{21}, G_{31}, G_{41}, G_{22}, G_{11}, G_{15}$.

Для оценки и сравнительного анализа системы молниезащиты на космодроме считаем, что появление молнии возможно, например, со стороны границы G_{22} , а именно, её левого края. Тогда на этой части границы G_{22} , а именно, на границе G_{23} выполняется условие:

$$\partial\mu/\partial n=0, (x,y) \in G_{23}. \quad (17)$$

Особенности дискретных математических моделей каждого этапа расчёта заключаются в том, что исходные области $B(x,y)$ и $D(x,y)$ представляются дискретными с регулярной прямоугольной

сеткой ($\Delta_x = \Delta_y$) по аналогии, например, [10]. При расчетах не учитываются размеры в горизонтальных сечениях элементов систем молниезащит 1-4 и металлической фермы 5, так как они пренебрежимо малы по сравнению с шагом Δ сетки по координатам x, y (по поверхности $F(x, y)$ между G_3 и G_4 расстояние 2000 м, а $H_1 = 1000$ м, при этом считаем, что в горизонтальном сечении металлическая ферма имеет размеры $4,0 \times 3,0$ м²).

Для каждой из областей $B(x, y)$ и $D(x, y)$ во внутренних узлах сетки выполняется условие сходимости итерационного метода Гаусса-Зейделя. В этих узлах дискретных областей потенциал ψ_{ij} рассчитывается с помощью численного метода, например, ускоренного метода Либмана с учётом уравнения Лапласа в конечно-разностных аппроксимациях как в [10]. На границах G_i областей $B(x, y)$ и $D(x, y)$ потенциалы ψ_{ij} рассчитываются с учетом конечно-разностных аппроксимаций на основе условий: 1) для области $B(x, y)$ используются граничные условия (7)-(10); 2) для области $D(x, y)$ соответственно граничные условия (12)-(17).

Результаты численных расчетов. При исследованиях на первом этапе существующих технических решений систем молниезащит ракет-носителей на космодромах в области $B(x, y)$ определяются поля распределения потенциала ψ и эквипотенциальные поверхности в виде уравнений $\psi_i = const$. Расчёты ведутся в безразмерном виде, а именно, потенциалы $\psi_i^* = \psi_i / \psi_0$, где ψ_0 – базовое значения потенциала в исследуемой области. Аналогично записываются безразмерные параметры и для других величин. Результаты численного расчета согласно уравнениям (6)-(10) для схемы моделирования области $B(x, y)$ системы молниезащиты, показаны на рис. 4 в виде распределения эквипотенциальных поверхностей $\psi_i^* = const$ с $\Delta\psi^* = const$.

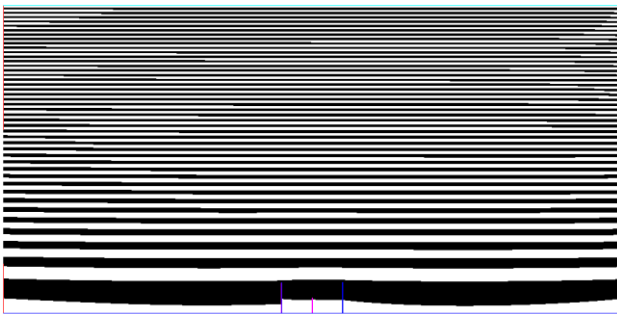


Рис. 4. Распределение эквипотенциальных поверхностей для исследуемой области $B(x, y)$ в виде $\psi_i^* = const$ с $\Delta\psi^* = const$

Последующая схема для математического моделирования области $D(x, y)$ с учётом системы молниезащиты на космодроме, показана на рис. 3. На основе полученных результатов величина H_4 выбирается равной 500 м.

A1. Для оценки и сравнительного анализа технического решения системы молниезащиты ракеты-носителя на космодроме (см. рис. 1) принимается дистанция l_1 от металлической фермы 5 до башни со стержнем 1 равной 200 м, т.е. элемент молниезащиты находится на границе G_{31} области

$D(x, y)$. Для исследования предлагаемого подхода на основе 2-х этапов считаем, что появление молнии возможно, например, со стороны границы G_{22} , а именно, её левого края границы G_{23} . Результаты численного расчета согласно уравнениям (11)-(17) для схемы моделирования области $D(x, y)$, показаны на рис. 5 в виде распределения поверхностей электрической функции потока $\mu_i^* = const$ с шагом $\Delta\mu^* = const$. При этом на рис. 5а показаны 30 функций потока μ_i^* ; рис. 5б соответственно 100 функций потока μ_i^* .

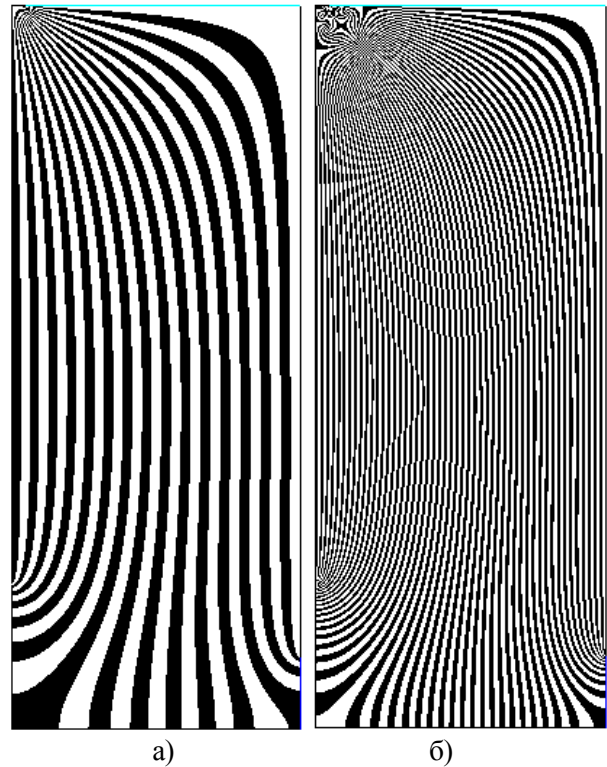


Рис. 5. Распределение поверхности электрической функции потока $\mu_i^* = const$ с шагом $\Delta\mu^* = const$ при $l_1 = 200$ м

Из результатов, представленных на рис. 5б, следует: 1) в объект 5 входят 19 функций потока μ_i^* и одна частично в объект 5 и в поверхность $F(x, y)$; 2) в поверхность $F(x, y)$ входят 38 функций потока μ_i^* ; 3) в элемент молниезащиты 1 входят 41 функция потока μ_i^* и одна частично в элемент 1 и в $F(x, y)$.

A2. Принимается дистанция l_1 от металлической фермы 5 до башни со стержнем 1 равной 100 м, т.е. элемент молниезащиты находится по середине между границей G_{31} и объектом 5 области $D(x, y)$. Результаты численного расчета для этой схемы моделирования области $D(x, y)$ с учётом $l_1 = 100$ м, показаны на рис. 6 в виде распределения поверхностей электрической функции потока $\mu_i^* = const$ с шагом $\Delta\mu^* = const$. При этом на рис. 6а показаны 30 функций потока μ_i^* ; рис. 6б соответственно 100 функций потока μ_i^* .

Из результатов, представленных на рис. 6б, следует: 1) в объект 5 входят 11 функций потока μ_i^* и одна частично в объект 5 и в поверхность $F(x, y)$; 2) в поверхность $F(x, y)$ входят 5 функций потока

μ_i^* ; 3) в элемент молниезащиты 1 входят 71 функция потока μ_i^* и 2 частично в элемент 1 и в поверхность $F(x,y)$, т.е. справа и слева от элемента 1.

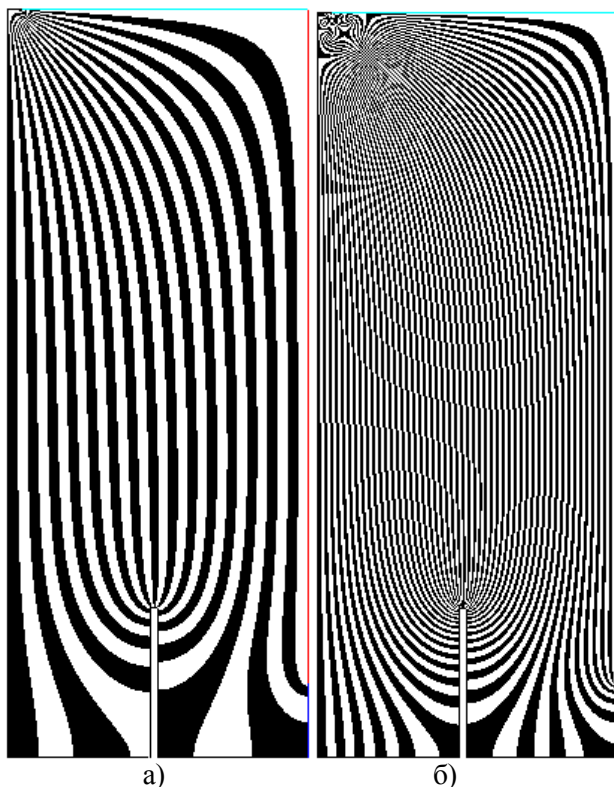


Рис. 6. Распределение поверхности электрической функции потока $\mu_i^* = const$ с шагом $\Delta\mu^* = const$ при $l_1 = 100$ м

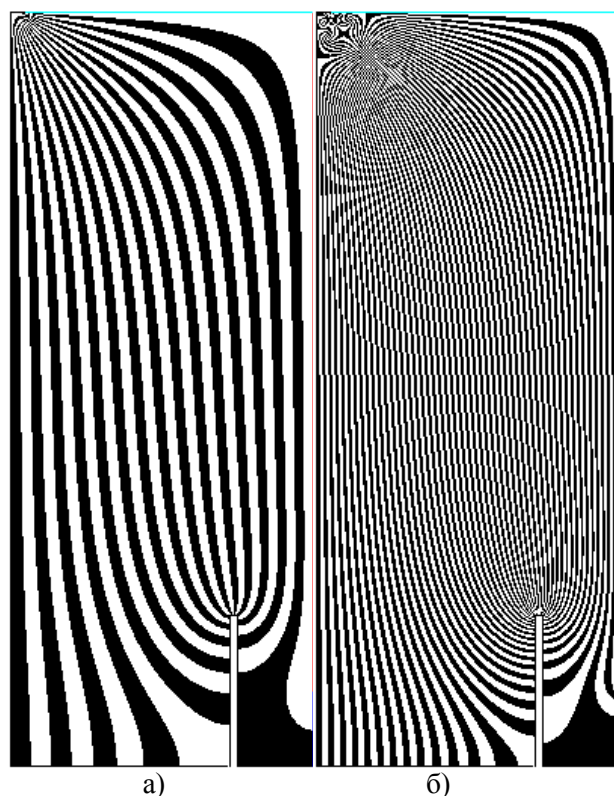


Рис. 7. Распределение поверхности электрической функции потока $\mu_i^* = const$ с шагом $\Delta\mu^* = const$ при $l_1 = 50$ м

А3. Принимается дистанция l_1 от металлической фермы 5 до башни со стержнем 1 равной 50 м. Результаты численного расчета для схемы моделирования области $D(x,y)$ с учётом $l_1 = 50$ м, показаны на рис. 7 в виде распределения поверхностей электрической функции потока $\mu_i^* = const$ с шагом $\Delta\mu^* = const$. При этом на рис. 7а показаны 30 функций потока μ_i^* ; рис. 7б соответственно 100 функций потока μ_i^* .

Из результатов, представленных на рис. 7б, следует: 1) в объект 5 входят 3 функций потока μ_i^* и одна частично в объект 5, в поверхность $F(x,y)$ и в элемент молниезащиты 1; 2) в поверхность $F(x,y)$ перед объектом 5 входит одна функция потока μ_i^* частично в объект 5, в поверхность $F(x,y)$ и в элемент молниезащиты 1 и 25 после элемента молниезащиты 1; 3) в элемент молниезащиты 1 входят 69 функция потока μ_i^* и 1 частично в элемент 1 и в поверхность $F(x,y)$.

Сравнительный анализ технического решения системы молниезащиты на космодроме (см. рис. 1) показывает следующее: 1) при дистанции $l_1 = 200$ м в объект 5 в целом входят 19 функций потока μ_i^* и одна частично, тогда относительная величина входа функций потока μ_i^* в объект 5 в процентах равна 20%; 2) при $l_1 = 100$ м в объект 5 входят 11 функций потока μ_i^* и одна частично, тогда относительная величина входа функций потока μ_i^* в объект 5 в процентах равна 12%; 3) при $l_1 = 50$ м в объект 5 входят 3 функций потока μ_i^* и одна частично, тогда относительная величина входа функций потока μ_i^* в объект 5 в процентах равна 4%. В заключение отметим, что для типичной системы из 4-х элементов молниезащиты ракетно-носителя с космическим аппаратом согласно распределению электрической функции потока μ_i^* при уменьшении дистанции l_1 с 200 до 50 м относительная величина входа функций μ_i^* в объект 5 уменьшается с 20 до 4%.

Выводы:

1. Анализ полученных результатов расчёта на основе предложенного подхода показал, что имеется возможность оценивать и выявлять особенности системы из 4-х элементов молниезащиты на космодроме. Например, установлено, что согласно распределению электрической функции потока μ_i^* при уменьшении дистанции l_1 в 4 раза, относительная величина входа функций μ_i^* в объект 5 уменьшается в 5 раз. Полученные результаты и выводы определяются соотношениями размеров исследуемой системы молниезащиты и соответствующими допущениями при расчётах.

2. Показаны особенности предложенного подхода для численного моделирования исследуемой системы молниезащиты на космодроме в два этапа. На первом этапе решения задачи определяются поле распределения потенциала ψ и эквипотенциальные поверхности $\psi_i^* = const$ с $\Delta\psi^* = const$. Затем относительно высоты H_1 на основе расчётов этого этапа выделяется некоторая область $D(x,y)$ до уровня H_4 относительно поверхности земли $F(x,y)$. На втором этапе определяется распределение поверхностей электрической функции потока $\mu_i^* = const$ с шагом $\Delta\mu^* = const$ при изменении,

например, дистанции l_1 от металлической фермы 5 до башни со стержнем 1.

3. Представлены особенности выбора области $D(x,y)$ в следующем виде: 1) на уровне H_4 выделенная поверхность $\psi_k=const$ должна быть параллельна границе G_2 , чтобы было исключено влияние системы молниезащиты на распределение напряженности поля на этом уровне; 2) H_4 должна превышать max высоту H_2 объектов 1-4 системы молниезащиты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. *Rakov, V.A.* Review and evaluation of lightning return stroke models including some aspects of their application / *V.A. Rakov, M.A. Uman* // IEEE Transactions Electromagnetic Compatibility. 1988. Vol. 40. P. 403-426.
2. *Раков, В.А.* Обзор недавних исследований молнии и молниезащиты / *В.А. Раков, Ф. Раушди* // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2010. №1. С. 24-47.
3. *Theethayi, N.* On the representation of the lightning return stroke process as a current pulse propagating along a transmission line / *N. Theethayi, V. Cooray* // IEEE Transactions on Power Delivery. 2005. Vol. 20. P. 823-837.
4. *Cooray, V.* Pulse propagation along transmission lines in the presence of corona and their implication to lightning return strokes / *V. Cooray, N. Theethayi* // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2008. Vol. 56. P. 1948-1959.
5. *Chitfanov, A.I.* Features of Controlling the Concentration of Electrical Discharge Energy in a Liquid for Compacting Powders / *A.I. Chitfanov, A.N. Potapenko, M.I. Knyasev* // In a book: Powder Compaction; Sintering; Post-sintering; Hot Isostatic Pressing; Microstructure. Granada, Spain. 1998. Vol. 2. P. 193-199.
6. *Чебанов, Ю.И.* Формирование поля давления на заготовке при штамповке на электрогидравлических установках / *Ю.И. Чебанов, В.К. Борисевич, М.К. Князев* // Кузнечно-штамповочное производство. 1996. №4. С. 15-18.
7. *Борисевич, В.К.* Построение расчётных моделей полей нагружения установки ЭГШ на основе эмпирических аппроксимаций / *В.К. Борисевич* и др. // Кузнечно-штамповочное производство. 1997. №9. С. 20-23.
8. *Потапенко, А.Н.* Математическое моделирование поля давлений в многоэлектродных разрядных блоках / *А.Н. Потапенко, М.И. Дыльков, А.И. Штифанов* // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2003. №9-10. С. 120-124.
9. *Kumar, U.* Lightning protection of satellite launch pads / *U. Kumar* // In a book: Lightning Protection. Series: IET Power and Energy Series, 58. Edited by *V. Cooray*. – London: Institution of Engineering and Technology. 2010. P. 789-819.
10. *Потапенко, А.Н.* Особенности метода инверсии для численного решения внешних краевых задач, связанных с электрическими полями в атмосфере / *А.Н. Потапенко, Е.А. Канунникова, Т.А. Потапенко* // Научно-технические ведомости СПб ГПУ. 2012. №1. С. 84-88.
11. *Potapenko, T.A.* Research of 3-D Exterior Boundary Problems Related to Electric Fields in Atmosphere by Inversion Method / *T.A. Potapenko, E.A. Kanunnikova, A.N. Potapenko* // 2012 International Conference on Lightning Protection (ICLP), Vienna, Austria. 2012.
12. *Резинкина, М.М.* Расчет трехмерных электрических полей в системах, содержащих тонкие проволоки / *М.М. Резинкина* // Электричество. 2005. № 1. С. 44-49.
13. *Смайт, В.Р.* Электростатика и электродинамика / *В.Р. Смайт*. – М.: Изд-во иностранной литературы, 1954. 606 с.

A POSSIBLE APPROACH FOR ESTIMATION THE LIGHTNING PROTECTION SYSTEMS OF CARRIER ROCKETS AT SPACE-LAUNCHING SITES

© 2012 A.N. Potapenko¹, V. Cooray², T.A. Potapenko¹

¹Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

²Uppsala University, Uppsala, Sweden

A features of numerical decision of a problem for study the distributed lightning protection system at a launch site with possibility of determine the investigated field on a base of potential and electric flow function are presented. Numerical calculations are executed, representing general results of investigated objects.

Key words: *lightning protection system, mathematical models, numerical calculations, electrostatic fields*

Anatoliy Potapenko, Candidate of Technical Sciences, Professor at the Department of Electrical Engineering and Automatics. E-mail: potapenko@intbel.ru

Vernon Coorey, Professor. E-mail: Vernon.Cooray@angstrom.uu.se

Tatiana Potapenko, Post-graduate Student. E-mail: ttwiggy@rambler.ru