

УДК 621.316.98: 22.193

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМ МОЛНИЕЗАЩИТ НА КОСМОДРОМАХ

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

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

² Уппсальский университет, Уппсала, Швеция

Поступила в редакцию 08.12.2012

Представлены особенности математического моделирования распределённых систем молниезащиты на стартовых площадках. Выполнены численные расчёты с представлением основных результатов расчёта электростатических полей с учётом комбинации стержневых и тросовых молниеприёмников.

Ключевые слова: система молниезащиты, математическая модель, численные расчёты, потенциальные поля, напряжённость поля

Удары молнии представляют угрозу не только ракетам-носителям (РН) на космодромах при нахождении на старте [1], но и летательным аппаратам [2] и РН, находящимся в полётах [3]. Например, после ударов молний в стартовавший «Сатурн-V» с «Аполлоном-12» (1969 г.) он смог продолжить полёт к Луне, но для РН «Атлас-Центавр» (1987 г.) это привело к аварии. Основные современные системы молниезащит, применяемые на космодромах, их особенности и характеристики представлены в обзоре [4]. Учитывая, что стартовые площадки располагаются недалеко от побережья, возникают проблемы с защитой РН от молний. В связи с этим системы молниезащит на космодромах исследуются с помощью различных методов, например, представленных в [4]. Среди известных методов исследований этих систем можно отметить моделирование на базе высоковольтных лабораторий, например, [5, 6]. При этом в [7] ставится под сомнение применение таких испытаний с учётом возможности удовлетворения всем основным критериям подобия для исследования атмосферных разрядов. Например, сложно учесть различные внешние возмущения при испытаниях. Если проанализировать удар молнии не в молниеприёмник системы молниезащиты на старте РН, а в стартовый комплекс, как в [1], то этот эффект на базе высоковольтных лабораторий получить чрезвычайно сложно, а, вероятнее, что невозможно. При этом удары молнии в систему молниезащиты на космодроме при стартах, например, шаттлов с «Атлантисом» (2006 г.) или «Индевором» (2009 г.) относительно легко могут моделироваться [6]. В [4] представлены существующие новые подходы к моделированию грозовых процессов, связанных с возникновением восходящего лидерного разряда в поле атмосферы и нисходящего лидера молнии, например, в [9, 10]. В

[11] исследованы особенности системы молниезащиты индийского стартового комплекса для РН. В рамках этой работы представлены исследования особенностей математического моделирования распределённых систем молниезащит на космодромах на базе цилиндрических и тросовых молниеприёмников.

Постановка задачи. Схема модели системы молниезащиты на космодроме в виде плана показана на рис. 1. Устройство 5, связанное с РН 6 на старте, представляется в виде металлической фермы. Считаем, что металлическая ферма 5 и РН 6 имеют в сечениях соответственно квадрат / прямоугольник и цилиндр.

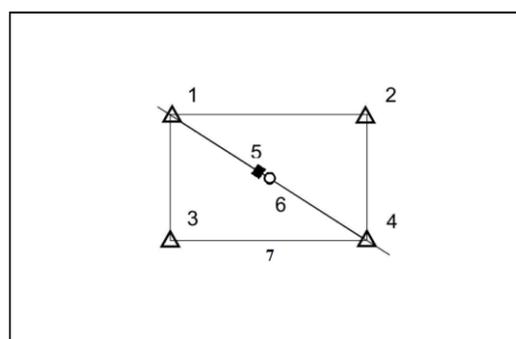


Рис. 1. Схема системы молниезащиты на космодроме: 1 – 4 – башни с цилиндрами и тросами на них по контуру; 5 – устройство, связанное с РН 6 на старте; 7 – тросы

Основные исследования проводятся для 2-х вариантов схем с возможным учётом комбинации стержней-цилиндров и тросовых молниеприёмников: 1) башни с металлическими цилиндрами в её верхней части и тросами по контуру; 2) башни с изолированными цилиндрами (в виде изоляторов) в её верхней части и тросами по контуру. Для постановки этой задачи важно отметить следующее. Результаты расчётов показали [12, 13], что при решении внешней краевой задачи на основе применения метода инверсии для полубесконечных областей (МИПО) и при решении внутренней краевой задачи

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

Курей Вернон, профессор E-mail: Vernon.Cooray@angstrom.uu.se

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

[14] на основе условия $\partial\psi/\partial n=0$ вместо $\psi=0$ на бесконечности в целом погрешность этих расчётов для аналогичных объектов была незначительная, но для определённой части области [13].

В связи с тем, что в этой работе исследуется распределённый объект и не учитывается краевой эффект облака, поэтому внешняя краевая задача сводится к внутренней на основе условия $\partial\psi/\partial n=0$. Исследования распределённого объекта проводятся в вертикальной диагональной плоскости стартовой площадки от 1-ой до 4-ой башни (см. рис. 1). При математическом моделировании системы молниезащиты используется схема, показанная на рис. 2.

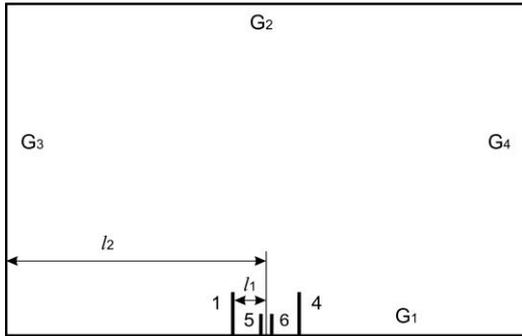


Рис. 2. Схема моделирования области $C(x,y)$ системы молниезащиты на космодроме (цифровые обозначения как на рис. 1)

Границы области $C(x,y)$ 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 искусственного ограничения $C(x,y)$, связанные с условием типа $\partial\psi/\partial n = 0$ (не учитывается краевой эффект от $V(x,y)$). Для каждого из двух вариантов модели соотношения следующие: $l_1=l_{10}=\text{const}$; $l_2=l_{20}=\text{const}$; высота $H_1=H_{10}=\text{const}$ (от $F(x,y)$ до нижней границы $V(x,y)$); высота башней $H_2=H_{20}=\text{const}$; высота металлической фермы и РН равны $H_3=H_{30}=\text{const}$; высота металлических или изолированных цилиндров на башнях $H_4=H_{40}=\text{const}$ (на вершинах цилиндров закреплены тросы).

На первом этапе математического моделирования считается, что величина H_{10} существенно превышает суммарную высоту H_{20} и H_{40} . В связи с этим можно считать, что вместо реальных соотношений размеров исследуемых объектов (башней с цилиндрами и тросами, металлической фермы и РН) их можно представлять линиями, но с учётом их высот. При решении задачи на этом этапе определяются поле ψ и эквипотенциальные поверхности $\psi_i=\text{const}$ с шагом $\Delta\psi=\text{const}$. Затем относительно высоты H_1 на основе расчётов этого этапа выделяется некоторая область $W(x,y)$ до уровня H_{fv} относительно поверхности $F(x,y)$. Это необходимо для того, чтобы на следующем этапе учесть соотношения исследуемых объектов. Для этого выполняется масштабирование части исходной области $C(x,y)$ с возможностью определения $W(x,y)$, причём вместо границы G_2 появляется граница G_{22} , являющаяся некоторой эквипотенциальной поверхностью

$\psi_{fv}=\text{const}$. Особенность выбора $W(x,y)$ следующая: 1) на уровне H_{fv} выбранная поверхность $\psi_{fv}=\text{const}$ должна быть параллельна границе G_2 , чтобы было исключено влияние исследуемых объектов на распределение напряженности поля на этом уровне; 2) H_{fv} должна превышать max высоту этих объектов. Для области $C(x,y)$ с учётом плоско-параллельной задачи поле распределения ψ определяется на основе решения уравнения Лапласа в виде

$$\square \partial^2 \psi / \partial x^2 + \partial^2 \psi / \partial y^2; (x,y) \in C(x,y). \quad (1)$$

Граничные условия с учётом рис. 2 следующие (общие для 2-х вариантов):

- а границе G_1 :

$$\psi(x,y)=0, (x,y) \in G_1; \quad (2)$$

- на границах G_3, G_4 :

$$\partial\psi/\partial n=0, (x,y) \in G_3, G_4; \quad (3)$$

- на границе G_2 :

$$\psi(x,y)=\psi_0, (x,y) \in G_2; \quad (4)$$

- на границах башен с цилиндрами 1 (G_{11}) и 4 (G_{14}), на металлической ферме 5 (G_{15}) и на РН 6 (G_{16}), заземлённых относительно $F(x,y)$:

$$\psi(x,y)=0, (x,y) \in G_{11}, G_{14}, G_{15}, G_{16}; \quad (5)$$

где $C(x,y)$ – исследуемая область, ограниченная $G_1 - G_4, G_{11}, G_{14}, G_{15}, G_{16}$.

На втором этапе математического моделирования определяются поле ψ и эквипотенциальные поверхности $\psi_i=\text{const}$ с шагом $\Delta\psi=\text{const}$ для выделенной области $W(x,y)$ с исследуемыми объектами. Границы области $W(x,y)$ следующие: G_{21} – граница в виде части G_1 ; G_{22} – граница на уровне H_{fv} в виде некоторой эквипотенциальной поверхности $\psi_{fv} = \text{const}$; G_{31}, G_{41} – границы соответствующие башням 1 и 4; G_{11b}, G_{14b} – границы соответствующие башням 1 и 4; G_{11c}, G_{14c} – границы соответствующие тросам на цилиндрах; G_{15g}, G_{16g} – границы соответствующие металлической ферме и РН. Для масштабированной области $W(x,y)$ поле распределения потенциала ψ определяется на основе решения уравнения Лапласа (1). Граничные условия (одинаковые для каждого из 2-х вариантов этого этапа) записываются следующим образом:

- на границе G_{21} :

$$\psi(x,y)=0, (x,y) \in G_{21}; \quad (6)$$

- на границах G_{31}, G_{41} :

$$\partial\psi/\partial n=0, (x,y) \in G_{31}, G_{41}; \quad (7)$$

- на границе G_{22} :

$$\psi(x,y) = \psi_{01}, (x,y) \in G_{22}; \quad (8)$$

- на границах башен G_{11b} , G_{14b} , на G_{15g} и на РН G_{16q} :

$$\psi(x,y)=0, (x,y) \in G_{11b}, G_{14b}, G_{15g}, G_{16q}; \quad (9)$$

Дополнительное граничное условие для 1-го варианта задачи с металлическими цилиндрами G_{11d} , G_{14d} следующее:

$$\psi(x,y)=0, (x,y) \in G_{11d}, G_{14d}. \quad (10)$$

Для этого варианта задачи тросы на металлических цилиндрах совпадают с их вершинами и не учитываются, так как они имеют одинаковый потенциал. Дополнительное граничное условие для 2-го варианта задачи с изолированными цилиндрами и с тросами G_{11e} , G_{14e} следующее:

$$\psi(x,y)=0, (x,y) \in G_{11e}, G_{14e}. \quad (11)$$

Для этого варианта задачи учитываются только тросы, находящиеся на верхних частях изолированных цилиндров. Считаем, что потенциалы ψ_0 и ψ_{01} на границах G_2 и G_{22} возникают в условиях электрических полей в атмосфере. При этом исследуются электростатические поля (ЭП) при условиях, что внешнее поле, прикладываемое к исследуемым объектам существенно мало, т.е. подразумевается отсутствие объёмных электрических зарядов в атмосфере исследуемых областей $C(x,y)$ и $W(x,y)$.

Результаты численных расчетов. Особенности дискретных математических моделей для каждого этапа расчёта заключаются в том, что исходные области $C(x,y)$ и $W(x,y)$ представляются дискретными с регулярной прямо-угольной сеткой ($\Delta_x=\Delta_y$), например, как в [12, 13]. При расчетах в области $C(x,y)$ не учитываются размеры в горизонтальных сечениях исследуемых объектов, так как они пренебрежимо малы по сравнению с шагом Δ сетки по координатам x, y (например, между G_3 и G_4 расстояние в пределах 2000 м, а высота до $V(x,y)$ порядка 1000 м). Учитываются только высоты этих объектов. Для каждой из расчётных областей $C(x,y)$ и $W(x,y)$ во внутренних узлах сетки выполняется условие сходимости итерационного метода Гаусса-Зейделя. В этих узлах дискретных областей потенциал $\psi_{i,j}$ рассчитывается с помощью численного метода, например, ускоренного метода Либмана с учётом уравнения Лапласа в конечно-разностных аппроксимациях как в [12]. На границах G_i областей $C(x,y)$ и $W(x,y)$ потенциалы $\psi_{i,j}$ рассчитываются с учетом конечно-разностных аппроксимаций для сформулированных условий. Численные расчёты ЭП для башен с металлическими цилиндрами в их верхних частях и с тросами показаны на рис. 3.

Расчёты представляются в безразмерном виде, а именно, потенциалы определяются как $\psi_i = \psi_i / \psi_0$; где ψ_0 – базовое значения потенциала на границе области, а компоненты напряженности электрического поля в виде $E_x^* = -\partial\psi^* / \partial x^*$; $E_y^* = -\partial\psi^* / \partial y^*$. Аналогично записываются безразмерные параметры и для других величин. Важно отметить, что при исследованиях распределенных систем

молниезащит определяются ЭП с учётом распределения потенциала ψ и эквипотенциальных поверхностей, а также поверхности равных напряженностей поля E_i в виде уравнений $E_i = \text{const}$. Численные расчёты ЭП башен с изолированными цилиндрами в их верхних их частях и с тросами показаны на рис. 4.

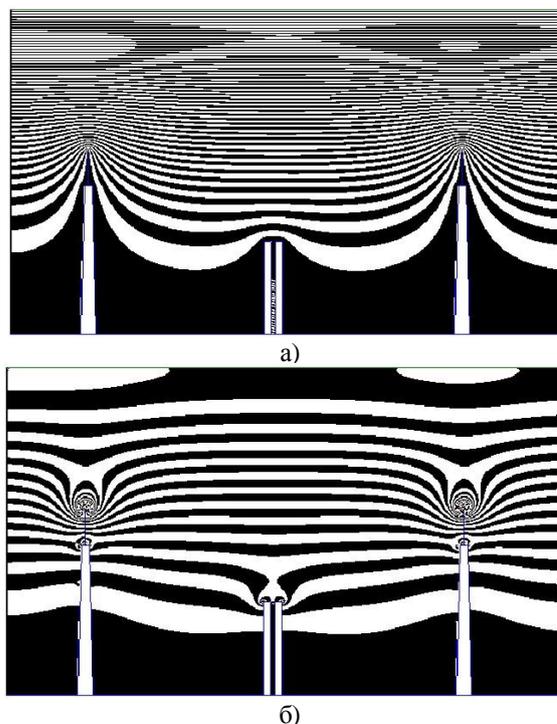


Рис. 3. Распределение эквипотенциальных поверхностей ЭП с шагом $\Delta\psi^*$ (а) и поверхностей равных напряженностей поля с шагом ΔE^* (б)

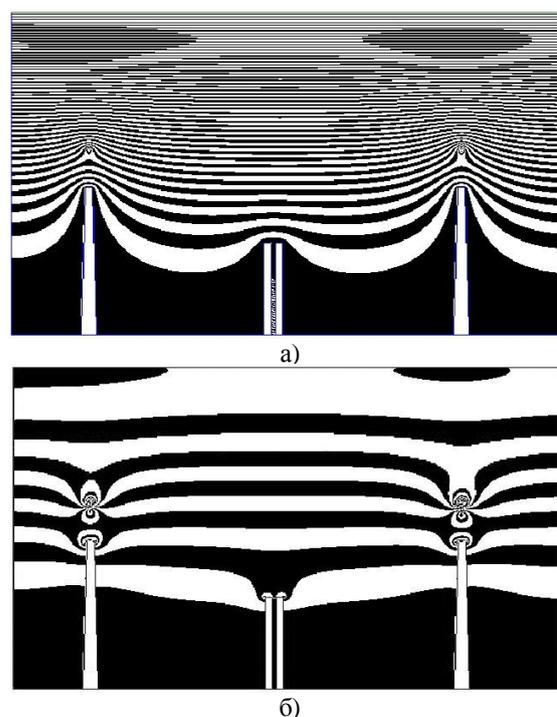


Рис. 4. Распределение эквипотенциальных поверхностей ЭП с шагом $\Delta\psi^*$ (а) и поверхностей равных напряженностей поля с шагом ΔE^* (б)

Сравнительный анализ результатов численных расчётов на рис 3б и рис. 4б для поверхностей равных напряженностей поля E_i показывает следующее:

1) Для первого варианта расчёта напряжённость E_{is}^* в среднем порядка 1060,5 на вершинах металлических цилиндров с тросами, а в верхней части РН (в угловых зонах) напряжённость E_{sp}^* в среднем около 316,5.

2) Для второго варианта расчёта напряжённость E_{it}^* в среднем порядка 1581,5 на тросах, а в верхней части РН (в угловых зонах) напряжённость E_{rp}^* в среднем около 599,5.

Сравнительный анализ систем молниезащит показывает следующее: 1) по первому варианту отношение E_{is}^*/E_{sp}^* в пределах 3,4 раза; 2) по второму варианту отношение E_{it}^*/E_{rp}^* приблизительно равно 2,6 раза. Численные расчёты на основе подхода электростатики позволяют оценить особенности распределённых систем молниезащит на стартовых площадках с учётом башен, цилиндров и тросов, а также позволяют сделать следующий вывод: башни с изолированными цилиндрами в верхних их частях и с тросами по контуру по сравнению с молниезащитой, имеющей в верхней части металлические цилиндры с тросами, позволяют повысить напряженность поля приблизительно в 1,5 раза, т.е. ($E_{it}^*/E_{is}^* = 1581,5/1060,5$). Учитывая эту особенность распределённой системы молниезащиты с изолированными цилиндрами и с тросами по контуру, тогда проверим возможность полного изолирования башен и с применением тросов с условием, что их высота определяется суммой высот H_{20} и H_{40} . Оценим влияние этого условия на ЭП, так как для систем молниезащит важно увеличение максимальных значений напряженности E_i^* на молниеприёмниках. Численные расчёты для исследуемой системы показаны на рис. 5.

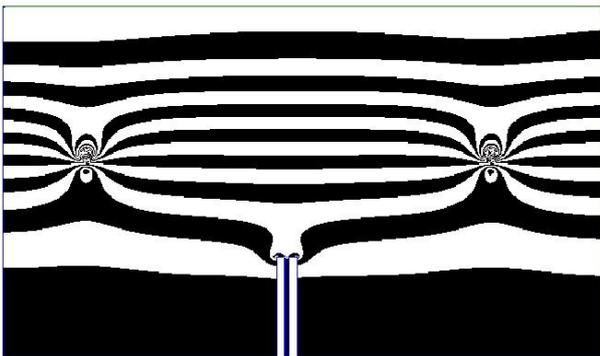


Рис. 5. Распределение поверхностей равных напряженностей поля с шагом ΔE^*

Анализ полученных результатов исследуемой молниезащиты показывает, что величины E_{it0}^* и E_{rp0}^* в среднем уменьшилась в пределах 7-8%, т.е. эффекта увеличения напряженности E_i на молниеприёмниках не наблюдалось. Из полученных результатов математического моделирования следует, что максимальная напряжённость E_i на молниеприёмниках превосходит напряженность на объектах защиты, поэтому можно провести исследования, например, для оценки возможного удара молнии в систему молниезащиты на старте, как это было с применением шатгла, например, для «Атлантиса», однако оценить возможность удара молнии с помощью используемого подхода в стартовый комплекс как в [1] невозможно. Для этого случая оценить возможность удара молнии в стартовый комплекс как в [1] можно на основе решения уравнения эллиптического типа для электрической функции потока μ [15] аналогичного уравнению Лапласа:

приёмниках превосходит напряженность на объектах защиты, поэтому можно провести исследования, например, для оценки возможного удара молнии в систему молниезащиты на старте, как это было с применением шатгла, например, для «Атлантиса», однако оценить возможность удара молнии с помощью используемого подхода в стартовый комплекс как в [1] невозможно. Для этого случая оценить возможность удара молнии в стартовый комплекс как в [1] можно на основе решения уравнения эллиптического типа для электрической функции потока μ [15] аналогичного уравнению Лапласа:

$$\partial^2 \mu / \partial x^2 + \partial^2 \mu / \partial y^2 = 0. \quad (12)$$

Численные расчёты ЭП на основе уравнения (12) и с учётом рис. 1 и рис. 2 для некоторой области $W_k(x,y)$ показаны на рис. 6.

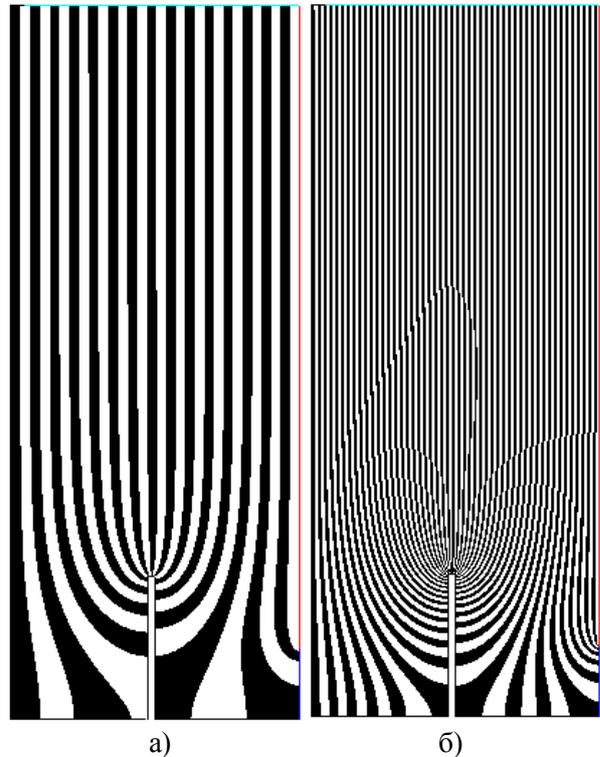


Рис. 6. Распределение поверхностей функции потока $\mu_i^* = const$ с $\Delta \mu^* = const$

При этом на рис. 6а показаны 30 функций потока μ_i^* ; рис. 6б соответственно 100 функций потока μ_i^* с учётом, например, равномерного распределения функций потока μ_i^* из верхней границы области $W_k(x,y)$. Из результатов, представленных на рис. 6, можно оценить количество функций потока μ_i^* , входящих в выбранную часть исследуемого объекта или в стартовую площадку. Например, в стартовую площадку (часть $F(x,y)$ области $W_k(x,y)$) до молниеприёмника входят 10 функций потока μ_i^* и одна частично в молниеприёмник и в $F(x,y)$. Тогда в процентном отношении 11% из 100 функций потока μ_i^* могут полностью и частично входить в стартовую площадку до молниеприёмника.

Выводы:

1. Численные расчёты на основе подхода электростатики позволили оценить возможности 2-х вариантов распределённых систем молниезащит на стартовых площадках и установить, что молние-приёмники на базе изолированных цилиндров и с тросами по контуру по сравнению с аналогичными молниеприёмниками, но с металлическими цилиндрами и с тросами, позволяют повысить напряжённость поля приблизительно в 1,5 раза.

2. Численное моделирование технического решения в виде распределённой системы молниезащиты на базе полного изолирования башен и с применением тросов в их верхних частях при условии равенства высот с исследуемыми и существующими системами молниезащиты показало, что эффекта увеличения напряжённости E_i на молние-приёмниках не наблюдалось.

3. Представленные расчёты не исключают возможности оценивания и выявления особенностей существующих систем молниезащит на космодромах на основе использования уравнения Лапласа (1) и/или уравнения (12) в зависимости от решаемой задачи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. NASA Facts AC 321/867-2468. Lightning and Space Program . FS-1998-08-16-KSC. August 1998.
2. *Uman, M.A.* The interaction of lightning with airborne vehicles / *M.A. Uman, V.A. Rakov* // *Progress in Aerospace Sciences*. 2003. V. 39. С. 61-81.
3. <http://www.testpilot.ru/espace/bibl/raketostr3/4-4-12.html>
4. *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.
5. *Kumar, U.* Analysis of Lightning Protection System for Indian Satellite Launch Pad / *U. Kumar, G.R. Nagabhushana* // National Interagency coordination group Lightning Conference, Orlando, Florida, USA, 12th April. 2000.
6. *Plumer, J.A.* Laboratory Test Results and Natural Lightning Strike Effects: How Well do They Compare / *J.A. Plumer* // 2012 International Conference on Lightning Protection (ICLP), Vienna, Austria. 2012.
7. *Van Brunt, R.J.* Early streamer emission lightning protection systems: An overview / *R.J. Van Brunt, T.L. Nelson, K.L. Stricklett* // *IEEE Electrical Insulation Magazine*. 2000. Vol. 16, No 1. P. 5-24.
8. <http://ibnlive.in.com/news/nasa-delays-decision-on-atlantis-launch/19923-11.html>
9. *Becerra, M.* Time dependent evaluation of the lightning upward connecting leader inception / *M. Becerra, V. Cooray* // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2006. 39. P. 4695-4702.
10. *Becerra, M.* A simplified physical model to determine the lightning upward connecting leader inception / *M. Becerra, V. Cooray* // *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2006. Vol. 21, No. 2. P. 897-908.
11. *Kumar, U.* Analysis of air termination system of the lightning protection scheme for the Indian satellite launch pad / *U. Kumar, N.T. Joseph* // In: *IEE Proceedings of Science, Measurement and Technology*. 2003. 150 (1). P. 3-10.
12. *Потапенко, А.Н.* Метод инверсии для численного расчёта распределённых систем типа «плоскость-проводник» / *А.Н. Потапенко, Е.А. Канунникова, Т.А. Потапенко* // *Научно-технические ведомости СПб ГПУ*. 2011. №5. С. 53-57.
13. *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.
14. *Резинкина, М.М.* Расчет трехмерных электрических полей в системах, содержащих тонкие проволоки / *М.М. Резинкина* // *Электричество*. 2005. №1. С. 44-49.
15. *Смайт, В.Р.* Электростатика и электродинамика / *В.Р. Смайт*. – М.: Изд-во иностранной литературы, 1954. 606 с.

SOME FEATURES OF MODELING THE LIGHTNING PROTECTION SYSTEMS AT SPACE-LAUNCHING SITES

© 2012 Т.А. Potapenko¹, V. Cooray², A.N. Potapenko¹

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

² Uppsala University, Uppsala, Sweden

A features of mathematical modeling of distributed lightning protection system at the launch site are presented. Numerical calculations are executed, representing general results of calculation of electrostatic field taking into account combined rod and wire lightning conductors.

Key words: *lightning protection system, mathematical model, numerical calculations, potential fields, field intensity*

Tatiana Potapenko, Post-graduate Student. E-mail: ttwiggy@rambler.ru
Vernon Coorey, Professor. E-mail: Vernon.Coorey@angstrom.uu.se
Anatoliy Potapenko, Candidate of Technical Sciences, Professor at the Department of Electrical Engineering and Automatics. E-mail: potapenko@intbel.ru