

13. *Klevtsov S.I., Klevtsova A.B.* Mul'tisegmentnaya prostranstvennaya model' graduirovochnoy kharakteristiki intellektual'nogo datchika [Multi-segment spatial model of the calibration characteristics of an intelligent sensor], *Mater. mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii "TSifrovye metody i tekhnologii"* [Materials of the international scientific conference "Digital methods and technologies"]. Part 4. Taganrog: Izd-vo "Anton", TRTU, 2005, pp. 21-26.
14. *P'yavchenko O.N., Mokrov E.A., Panich A.E., Klevtsov S.I., P'yavchenko A.O., Fedorov A.G., Udod E.V.* Metody, modeli, algoritmy i arkhitektura pretsizionnykh intellektual'nykh datchikov davleniya [Methods, models, algorithms and architecture of precision intelligent pressure sensors]. Taganrog: Izd-vo TTI YuFU, 2007, 130 p.
15. *Klevtsov S.I.* Osobennosti primeneniya modeley graduirovochnykh kharakteristik datchikov davleniya [Features of application of models of calibration characteristics of pressure sensors], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2008, No. 1 (78), pp. 25-26.
16. *Klevtsov S.I., Udod E.V.* Prostranstvennaya ploskostnaya model' graduirovochnoy kharakteristiki intellektual'nogo datchika davleniya [Spatial planar model of the calibration characteristics of an intelligent pressure sensor], *Izvestiya TRTU* [Izvestiya TSURE], 2005, No. 1, pp. 99-107.
17. *P'yavchenko O.N., Klevtsov S.I.* Povyshenie tochnosti obrabotki rezul'tatov izmereniya v intellektual'nykh datchikakh–izmeritelyakh fizicheskikh signalov [Improving the accuracy of processing measurement results in intelligent sensors–meters of physical signals], *Elektronika i sistemy upravleniya* [Electronics and control systems], 2006, No. 1, pp. 16-21.
18. *Semenov L.A., Siraya T.N.* Metody postroeniya graduirovochnykh kharakteristik sredstv izmereniy [Methods of construction of calibration characteristics of measuring instruments]. Moscow: Izd-vo standartov, 1986.
19. *Klevtsov S.I.* Mul'tisegmentnaya prostranstvennaya approksimatsiya graduirovochnoy kharakteristiki mikroprotsessornogo datchika [Multi-segment spatial approximation of the calibration characteristic of a microprocessor sensor], *Metrologiya* [Metrology], 2011, No. 7, pp. 26-36.
20. *Klevtsov and Y. Udod.* Model of the Spatial Conversion Characteristics for Graduation of the Microprocessor-Based Sensor's with Indemnification of Influence Destabilizing Factors, Proc. 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), 2015, pp. 1-5. DOI: 10.1109 / SIBCON.2015.7147097.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.В. Тютиков.

Клевцов Сергей Иванович – Южный федеральный университет; e-mail: sergkmps@mail.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 88634328025; к.т.н.; доцент.

Klevtsov Sergey Ivanovich – Southern Federal University; e-mail: sergkmps@mail.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634328025; cand. of eng. sc; associate professor.

УДК 551.554

DOI 10.18522/2311-3103-2022-3-234-243

Г.В. Куповых, А.Г. Клово, В.В. Гривцов, О.В. Белоусова

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ НЕТУРБУЛЕНТНОГО ПРИЗЕМНОГО СЛОЯ

Представлена электродинамическая модель атмосферного приземного слоя, обусловленная действием электродного эффекта вблизи поверхности земли, и анализ ее уравнений методами теории подобия. Отдельно рассмотрены математические модели электрического состояния приземного слоя в приближениях классического и турбулентного электродного эффекта. В математической постановке задач моделирования классического электродного слоя сделан ряд обоснованных физических допущений, позволивших получить аналитические решения уравнений. Получены аналитические формулы для расчетов профилей концентраций аэроионов, плотности объемного электрического заряда и напряженности электрического поля в электродном слое. В результате математического модели-

рования исследованы зависимости распределения электрических характеристик приземного слоя от значений электрического поля, степени ионизации воздуха и аэрозольного загрязнения атмосферы. Показано, что отношение значений напряжённости электрического поля на поверхности земли и на верхней границе электродного слоя практически постоянно. Усиление электрического поля, скорости ионизации воздуха и присутствие аэрозольных частиц достаточной концентрации приводит к уменьшению толщины электродного слоя и, как следствие, масштабов распределения его параметров. Повышение степени ионизации увеличивает, а увеличение концентрации аэрозольных частиц в атмосфере уменьшает значения плотности электрического заряда в приземном слое. Теоретические расчеты хорошо согласуются с экспериментальными данными и результатами численного моделирования электрической структуры приземного слоя. Полученные в работе аналитические формулы для расчетов электрических характеристик приземного слоя и результаты вычислений могут быть полезны при решении ряда прикладных задач геофизики, в частности для мониторинга электрического состояния атмосферы.

Математическое моделирование; электродинамика; приземный слой; атмосфера; электродный эффект; электрическое поле; аэроионы; ионизация; аэрозоль.

G.V. Kupovykh, A.G. Klovo, V.V. Grivtsov, O.V. Belousova

MODELING OF THE NON-TURBULENT SURFACE LAYER ELECTRODYNAMIC STRUCTURE

The article presents an electrodynamic model of the atmospheric surface layer caused by the action of the electrode effect near the earth's surface, and an analysis of its equations by methods of similarity theory. Mathematical models of the surface layer electrical state in the approximations of the classical and turbulent electrode effect are considered separately. In the mathematical formulation of modeling problems, a number of well-founded physical assumptions were created that made it possible to obtain analytical solutions to the equations. Analytical formulas have been obtained for calculating the profiles of aeroion concentrations, the density of the space electric charge and the electric field in the electrode layer. As a result of mathematical modeling, the dependences of the electrical characteristics distribution in the surface layer on the values of the electric field, the degree of air ionization and aerosol pollution of the atmosphere are investigated. It is shown that the ratio of the electric field values on the earth's surface and at the upper boundary of the electrode layer is almost constant. The increasing of the electric field, the rate of air ionization and the presence of sufficient concentration aerosol particles leads to a decrease in the thickness of the electrode layer and, as a consequence, the scale of distribution of its parameters. An amplification in the degree of ionization increases, and an increase in the concentration of aerosol particles in the atmosphere decreases the values of the electric charge density in the surface layer. Theoretical calculations are in good agreement with experimental data and the results of numerical modeling of the surface layer electrical structure. The analytical formulas obtained in the work for calculating the electrical characteristics of the surface layer and the results of calculations can be useful in solving a number of applied problems of geophysics, in particular for monitoring the electrical state of the atmosphere.

Mathematical modeling; electrodynamics; surface layer; atmosphere; electrode effect; electric field; aeroions; ionization; aerosol.

Введение. Электродинамическое состояние приземного слоя атмосферы определяется глобальным электрическим полем, а также локальным действием электродного эффекта вблизи поверхности земли. Последний зависит от метеорологических условий, ионизации воздуха, степени аэрозольного и радиоактивного загрязнений. Известно много электродинамических моделей приземного слоя, основанных на теории электродного эффекта в атмосфере, и имеются результаты их численных расчетов [1–4]. Для практических оценок электрического состояния атмосферы представляют интерес аналитические выражения, следующие из уравнений электродного эффекта с некоторыми обоснованными физическими допущениями.

Постановка задачи моделирования. Основной задачей электродинамики приземного слоя атмосферы является нахождение пространственно-временных распределений электрических характеристик: концентраций полярных аэроионов ($n_{1,2}$) и электрического поля (E) в различных условиях, а также плотности объемного заряда, плотности электрического тока и т.д.

Электродинамическая модель горизонтально-однородного свободного от аэрозоля приземного слоя атмосферы в приближении электродного эффекта [3, 4] состоит из ионизационно-рекомбинационных уравнений и уравнения Пуассона:

$$\begin{aligned} \frac{\partial n_{1,2}}{\partial t} \pm \frac{\partial}{\partial z} (b_{1,2} \cdot n_{1,2} E) - \frac{\partial}{\partial z} (D_T(z) \frac{\partial n_{1,2}}{\partial z}) &= q - \alpha n_1 n_2, \\ \frac{\partial E}{\partial z} &= \frac{e}{\varepsilon_0} (n_1 - n_2) \end{aligned} \quad (1)$$

где $b_{1,2}$ – подвижности полярных аэроионов, α – коэффициент рекомбинации, $D_T = D_j z$ – коэффициент турбулентной диффузии аэроионов, q – скорость ионизации воздуха, e – элементарный заряд, ε_0 – электрическая постоянная.

Для исследования математической модели (1) используем методы теории подобия. Введем безразмерные переменные, используя характерные значения и масштабы входящих в них физических величин:

$$t' = t/T, \quad z' = z/l_1, \quad n'_{1,2} = n_{1,2}/n_\infty, \quad E' = E/E_\infty, \quad n_\infty = \sqrt{q_\infty/\alpha}, \quad l_1 = D_1 \cdot \tau, \quad \tau = (q_\infty \alpha)^{-1/2}. \quad (2)$$

Тогда получаем уравнения в безразмерной форме:

$$\begin{aligned} \frac{\tau}{T} \frac{\partial n'_{1,2}}{\partial t'} - \frac{\partial}{\partial z'} \left(z' \frac{\partial n'_{1,2}}{\partial z'} \right) \pm \xi_{1,2} \frac{\partial}{\partial z'} (n'_{1,2} E') &= \frac{q}{q_\infty} - n'_1 n'_2, \\ \frac{\partial E'}{\partial z'} &= \gamma (n'_1 - n'_2). \end{aligned} \quad (3)$$

Знак « ∞ » означает верхнюю границу (z_∞) электродного слоя. Характерное время протекания метеорологических процессов в атмосфере $T \sim 1-3$ ч, тогда как время релаксации для аэроиона - $\tau = 300$ с ($q_\infty = 10^7 \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$ и $\alpha = 1,6 \cdot 10^{-12} \text{ м}^3 \text{ с}^{-1}$). Поэтому далее будем рассматривать стационарные модели. Систему (3) характеризуют два безразмерных параметра (критерии подобия):

$$\xi_{1,2} = \frac{|b_{1,2}| \cdot E_\infty \cdot \tau}{l_1}, \quad \gamma = \frac{e}{\varepsilon_0} \frac{n_\infty}{E_\infty} l_1. \quad (4)$$

Когда параметр $\xi_{1,2} \geq 1$, имеет место классический электродный эффект [5–7], то есть пространственно-временное распределение аэроионов в приземном слое обусловлено только электрическими силами. Если $\xi_{1,2} < 1$, имеет место турбулентный электродный эффект: перенос аэроионов в атмосфере осуществляется, наряду с электрическими силами, турбулентными потоками воздуха [8–10]. Если $\xi_{1,2} \ll 1$, имеет место приближение сильного турбулентного перемешивания, когда перенос аэроионов осуществляется только турбулентной диффузией [1, 2].

Далее во всех модельных случаях будем предполагать выполненным условие $|\gamma| \ll 1$, тогда электрическое поле, создаваемое объёмным зарядом, можно считать постоянным.

Модель классического электродного слоя свободного от аэрозоля. Как следует из теории электродного эффекта (при условии $\xi_{1,2} \geq 1$) профиль концентрации положительных ионов проводимости практически не зависит от высоты

($n_1 \approx const$) [2, 5, 7]. Для получения аналитических решений сделаем следующие физические допущения: $E = const$, $q = const$. Тогда, рассмотрим уравнение только для концентрации отрицательных аэроионов с соответствующим граничным условием:

$$\begin{aligned} -b_2 E \frac{dn_2}{dz} &= q - \alpha n_1 n_2, \\ n_2(z=0) &= 0. \end{aligned} \quad (5)$$

Решением (5) является выражение, описывающее распределение отрицательных аэроионов по высоте:

$$n_2(z) = \frac{q}{\alpha n_1} \cdot \left(1 - \exp\left(\frac{\alpha n_1 z}{b_2 E}\right) \right). \quad (6)$$

Плотность электрического заряда, создаваемого ионами проводимости, может быть рассчитана по формуле:

$$\rho(z) = e(n_1(z) - n_2(z)). \quad (7)$$

Тогда получаем:

$$\rho(z) = e \left(n_1 - \frac{q}{\alpha n_1} \cdot \left(1 - \exp\left(\frac{\alpha n_1 z}{b_2 E}\right) \right) \right). \quad (8)$$

Для расчета напряжённости электрического поля, как следует из теории классического электродного эффекта [2, 5, 7], воспользуемся тем, что плотность электрического тока проводимости (j) не меняется по высоте, а значение можно рассчитать по закону Ома, используя формулу для проводимости воздуха (λ):

$$j = \lambda \cdot E, \quad \lambda = e(b_1 n_1 + b_2 n_2), \quad (9)$$

где $n_{1,2} = (q/\alpha)^{1/2}$ асимптотические значения на верхней границе электродного слоя [2].

Тогда для расчета напряженности электрического поля имеем формулу:

$$E(z) = j/\lambda(z), \quad (10)$$

где $\lambda(z)$ рассчитывается аналогично (9), но на соответствующей высоте. Для расчётов параметры модели задавались следующими параметрами: $b_{1,2} = 1,4 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$, $q = 10^7 \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$, $\alpha = 1,6 \cdot 10^{-12} \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$.

Результаты расчетов характеристик классического электродного слоя в зависимости от интенсивности электрического поля и степени ионизации воздуха представлены на рис. 1-2.

Во всех случаях электродный эффект E_0/E_∞ (отношение значений напряжённости электрического поля на поверхности земли и на верхней границе электродного слоя) практически одинаков, что согласуется с численными моделями [2, 5, 6, 16]. Усиление электрического поля приводит к уменьшению толщины электродного слоя, масштабов распределения и, следовательно, значений напряжённости поля и плотности объемного заряда. Увеличение скорости ионизации воздуха также уменьшает толщину электродного слоя, но при этом увеличиваются значения плотности электрического заряда.

Следует отметить, что проведенные теоретические расчеты хорошо согласуются с экспериментальными данными [13, 18].

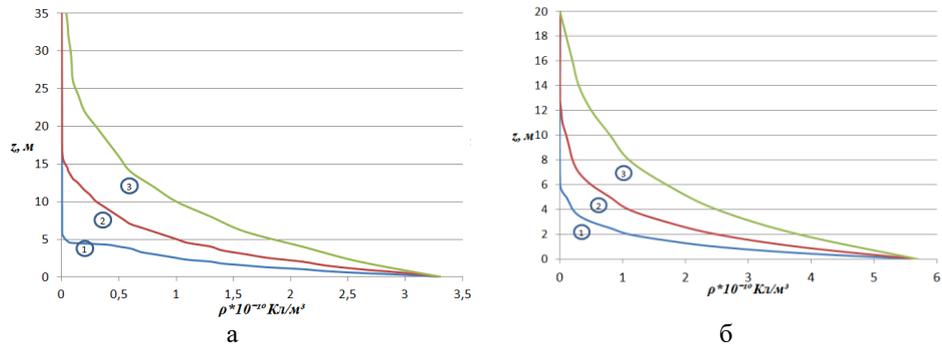


Рис. 1. Плотность объемного заряда в электродном слое ($q = 7 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3}\text{с}^{-1}$ (а), $q = 20 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3}\text{с}^{-1}$ (б), $E = -50 \text{ В/м}$ (1), $E = -100 \text{ В/м}$ (2), $E = -200 \text{ В/м}$ (3))

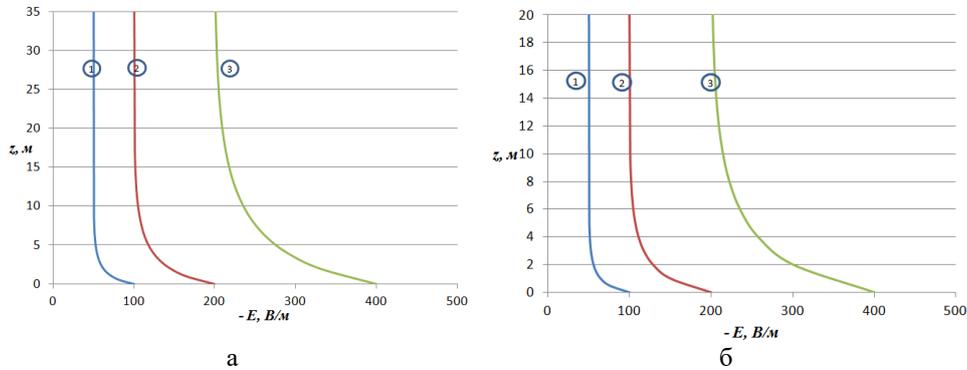


Рис. 1. Электрическое поле в электродном слое ($q = 7 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3}\text{с}^{-1}$ (а), $q = 20 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3}\text{с}^{-1}$ (б), $E = -50 \text{ В/м}$ (1), $E = -100 \text{ В/м}$ (2), $E = -200 \text{ В/м}$ (3))

Модель классического электродного слоя в условиях аэрозольного загрязнения. Предположим, что приземный слой заполнен однократно заряженными монодисперсными аэрозольными частицами. В правой части ионизационно-рекомбинационных уравнений, добавим член, описывающий взаимодействие аэроионов с аэрозолем в виде $BNn_{1,2}$, что оправдано отсутствием переноса тяжелых ионов [7, 11, 12, 14, 15]. Для концентраций аэрозольных частиц сопоставимых или превышающих значения для аэроионов рекомбинацией можно пренебречь [7, 12]. Здесь $B = \frac{2\eta_1\eta_2}{\eta_1 + 2\eta_2}$ – параметр, зависящий от коэффициентов взаимодействия

легких ионов, нейтральных и заряженных аэрозольных частиц, N – полная концентрация аэрозольных частиц, $\eta_{1,2}$ – коэффициенты воссоединения полярных аэроионов с аэрозольными частицами ($\eta_1 = 1,4 \cdot 10^{-12} \text{ м}^{-3}\text{с}^{-1}$, $\eta_2 = 4 \cdot 10^{-12} \text{ м}^{-3}\text{с}^{-1}$).

С учетом сделанных выше допущений, рассмотрим уравнение для концентрации отрицательных аэроионов с соответствующим граничным условием:

$$-b_2 E \frac{dn_2}{dz} = q - BNn_{1,2}, \quad n_2(z=0) = 0. \tag{11}$$

Решением (11) является выражение, описывающее распределение отрицательных аэроионов по высоте:

$$n_2(z) = \frac{q}{BN} \left(1 - \exp\left(\frac{BN}{b_1 E} z\right) \right). \quad (12)$$

Распределение плотности электрического заряда, создаваемого аэроионами, может быть рассчитано по формуле (7) и равно:

$$\rho(z) = e \left(n_1 - \frac{q}{BN} \left(1 - \exp\left(\frac{BN}{b_1 E} z\right) \right) \right). \quad (13)$$

Профили плотности объемного заряда в классическом электродном слое при различных значениях концентраций аэрозольных частиц, напряженности электрического поля и скорости ионизации воздуха представлены на рис. 3-4.

Наличие аэрозольных частиц в атмосфере приводит к уменьшению высоты электродного слоя и плотности электрического заряда в нем. Увеличение ионизации, как и усиление электрического поля приводит к увеличению плотности объемного заряда вблизи поверхности земли, но в меньшей степени, чем в чистой атмосфере.

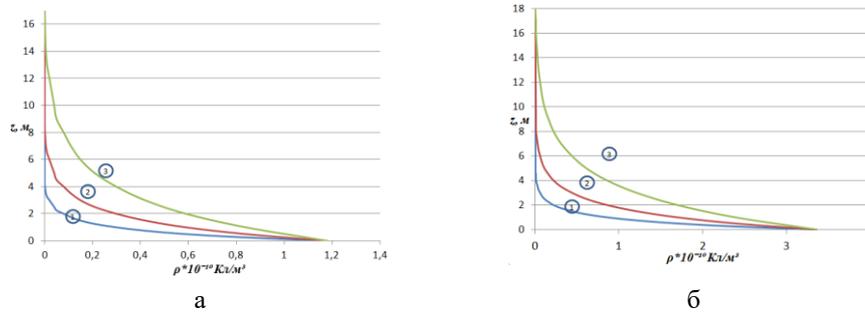


Рис. 3. Плотность объемного заряда в электродном слое с аэрозолем концентрацией $N = 8 \cdot 10^9 \text{ м}^{-3}$ ($q = 7 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$ (а), $q = 20 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$ (б), $E = -50 \text{ В/м}$ (1), $2 - E = -100 \text{ В/м}$ (2), $E = -200 \text{ В/м}$ (3))

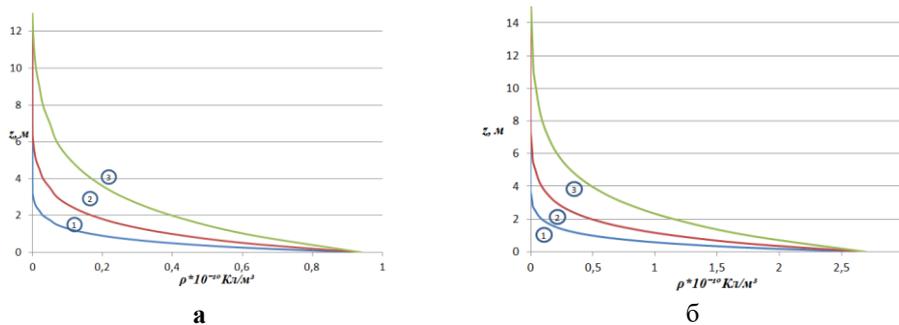


Рис. 4. Плотность объемного заряда в электродном слое с аэрозолем концентрацией $N = 10^{10} \text{ м}^{-3}$ ($q = 7 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$ (а), $q = 20 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$ (б), $E = -50 \text{ В/м}$ (1), $2 - E = -100 \text{ В/м}$ (2), $E = -200 \text{ В/м}$ (3))

Для расчета профиля напряженности электрического поля воспользуемся формулами (9) и (10) с учетом того, что для системы (11) асимптотические значения концентраций аэроионов на верхней границе электродного слоя изменяются и становятся равны $n_{1,2} = \frac{q}{BN}$. Результаты расчетов для различных значений параметров электродного слоя приведены на рис. 5, 6.

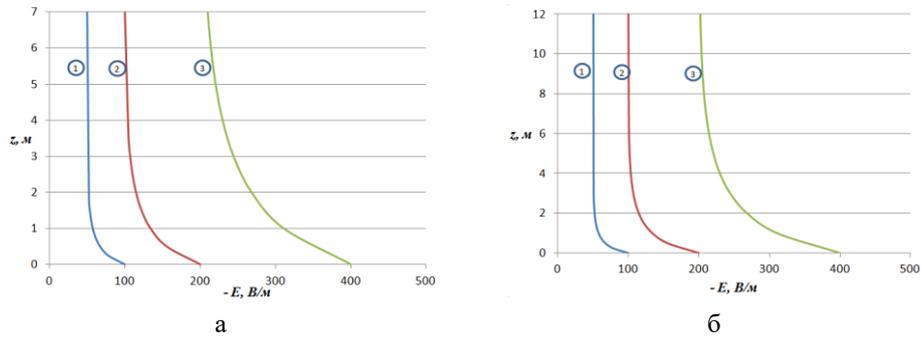


Рис. 5. Электрическое поле в классическом электродном слое с аэрозолем концентрацией $N=8 \cdot 10^9 \text{ м}^{-3}$ ($q = 7 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$ (а), $q = 20 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$ (б), $E = -50 \text{ В/м}$ (1), $E = -100 \text{ В/м}$ (2), $E = -200 \text{ В/м}$ (3))

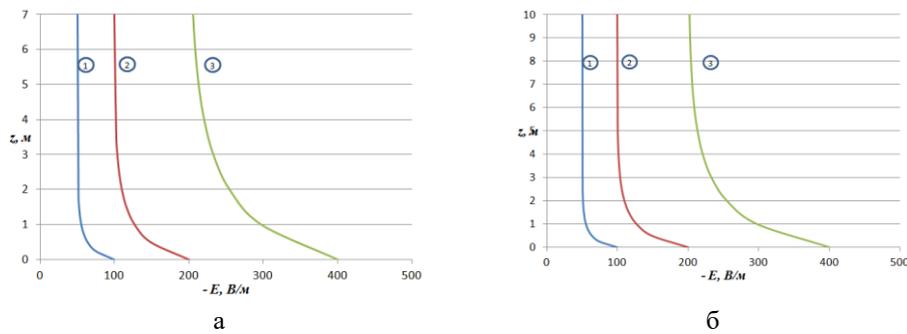


Рис. 6. Электрическое поле в классическом электродном слое с аэрозолем концентрацией $N=8 \cdot 10^9 \text{ м}^{-3}$ ($q = 7 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$ (а), $q = 20 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$ (б), $E = -50 \text{ В/м}$ (1), $E = -100 \text{ В/м}$ (2), $E = -200 \text{ В/м}$ (3))

В условиях аэрозольного загрязнения масштаб распределения напряжённости электрического поля уменьшится с увеличением концентрации частиц, тогда как электродный эффект E_0/E_∞ во всем электродном слое почти не меняется.

Заключение. Для оценки электрического состояния атмосферы и на основании теории электродного эффекта сделаны обоснованные физические допущения и построены упрощенные модели классического электродного слоя в чистой атмосфере и при наличии в ней аэрозольных частиц. Получены аналитические решения, описывающие распределения концентраций ионов проводимости, плотности объемного заряда и электрического поля, в зависимости от степени ионизации воздуха и его аэрозольного загрязнения. Полученные приближенные аналитические решения хорошо согласуются с известными теоретическими и экспериментальными данными и могут быть полезны при решении ряда прикладных задач геофизики, в частности для мониторинга состояния атмосферы [19, 20].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Морозов В.Н. Атмосферное электричество // Атмосфера. Справочник (справочные данные, модели). – Л.: Гидрометеониздат, 1991. – С. 394-408.
2. Куповых Г.В., Морозов В.Н., Шварц Я.М. Теория электродного эффекта в атмосфере. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 1998. – 123 с.

3. *Куповых Г.В.* Электродинамические процессы в приземном слое атмосферы. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2009. – 114 с.
4. *Свидельский С.С., Литвинова В.С., Куповых Г.В., Клово А.Г.* Формирование структуры атмосферного электродного слоя // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2020. – № 5. – С. 130-141.
5. *Hoppel W.A.* Theory of the electrode effect // Journal Atmospheric and Terrestrial Physics. – 1967. – Vol. 29, No. 6. – P. 709-721.
6. *Куповых Г.В., Морозов В.Н.* Классический (нетурбулентный) электродный эффект в приземном слое // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. – 2003. – № 2. – С. 43-46.
7. *Куповых Г.В., Клово А.Г., Тимошенко Д.В., Свидельский С.С.* Приближенное аналитическое решение задачи об электродинамическом состоянии приземной атмосферы в условиях аэрозольного загрязнения // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. – 2018. – № 2. – С. 84-89.
8. *Редин А.А., Клово А.Г., Куповых Г.В.* Электродинамическая модель атмосферного приземного слоя // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2009. – № 8. – С. 93-106.
9. *Hoppel W.A.* Electrode effect: comparison of the theory and measurement // In: Planetary Electrodynamics, 2, S.C. Coroniti and J. Hughes; ed.: Gordon and Breach Science Publishers, New York, 1969. – P. 167-181.
10. *Куповых Г.В.* Электричество приземного слоя // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. – 1995. – № 4. – С. 32-34.
11. *Редин А.А., Клово А.Г., Куповых Г.В., Морозов В.Н.* Генерация объемного заряда вблизи поверхности земли с учетом взаимодействия аэрозольных частиц с аэроионами // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. Спецвыпуск. Физика атмосферы. – 2010. – С. 81-85.
12. *Редин А.А., Клово А.Г., Куповых Г.В.* Математическое моделирование электродинамической структуры приземного слоя атмосферы в условиях аэрозольного загрязнения // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2009. – № 7 (96). – С. 192-200.
13. *Куповых Г.В., Болдырев А.С., Литвинова И.С., Марченко А.Г.* О связи электрического поля с объемным зарядом в приземном слое атмосферы // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. Приложение № 3. – 2003. – С. 42-45.
14. *Hoppel W.A., Frick G.M.* Ion-Aerosol Attachment Coefficients and the Steady-State Charge Distribution on Aerosols in a Bipolar Ion Environment // Aerosol Science and Technology. – 1986. – 5:1. – P. 1-21.
15. *Hoppel W.A.* Ionaerosol attachment, ion depletion and charge distribution on aerosols // J. Geoph. Res. – 1985. – Vol. 90, No. D4. – P. 5917-5923.
16. *Куповых Г.В., Редин А., Болдырев А.* Modeling of ionization-recombination processes in the atmospheric surface layer // Journal of Electrostatics 71. Elsevier B.V. – 2013. – P. 305-311.
17. *Куповых Г.В., Тимошенко Д.В., Клово А. Г., Кудринская Т.В.* Electrodynamic processes models in atmospheric surface layer // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 698 044034. – 8 p.
18. *Кудринская Т.В., Куповых Г.В., Редин А.А.* Исследования ионизационного состояния приземного слоя атмосферы в разных геофизических условиях // Метеорология и гидрология. – 2018. – № 4 – С. 77-85.
19. *Шулейкин В.Н., Щукин Г.Г., Куповых Г.В.* Развитие методов и средств прикладной геофизики – атмосферно-электрический мониторинг геологических неоднородностей и зон геодинамических процессов. – СПб.: РГТМУ, 2015. – 206 с.
20. *Куповых Г.В., Кудринская Т.В., Гривитсов В.В.* The atmosphere electrical characteristics' monitoring as an element of technosphere safety // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. 913 052041. – 6 p.

REFERENCES

1. *Morozov V.N.* Atmosfernoe elektrichestvo [Atmospheric electricity], *Atmosfera. Spravochnik (spravochnye dannye, modeli)* [Atmosphere. Reference book (reference data, models)]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1991, pp. 394-408.
2. *Куповых Г.В., Морозов В.Н., Шварц Я.М.* Teoriya elektrodnoogo effekta v atmosphere [Theory of the electrode effect in the atmosphere]. Taganrog: Izd-vo TRTU, 1998, 123 p.

3. *Kupovykh G.V.* Elektrodinamicheskie protsessy v prizemnom sloe atmosfery [Electrodynamic processes in the surface layer of the atmosphere]. Taganrog: Izd-vo TTI YuFU, 2009, 114 p.
4. *Svidel'skiy S.S., Litvinova V.S., Kupovykh G.V., Klovo A.G.* Formirovanie struktury atmosfernogo elektrodnogo sloya [Formation of the structure of the atmospheric electrode layer], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2020, No. 5, pp. 130-141.
5. *Hoppel W.A.* Theory of the electrode effect, *Journal Atmospheric and Terrestrial Physics*, 1967, Vol. 29, No. 6, pp. 709-721.
6. *Kupovykh G.V., Morozov V.N.* Klassicheskiy (neturbulentnyy) elektroodnyy effekt v prizemnom sloe [Classical (non-turbulent) electrode effect in the surface layer], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severo-Kavkazskiy region. Estestvennye nauki* [Izvestia of higher educational institutions. North Caucasus region. Natural sciences], 2003, No. 2, pp. 43-46.
7. *Kupovykh G.V., Klovo A.G., Timoshenko D.V., Svidel'skiy S.S.* Priblizhennoe analiticheskoe reshenie zadachi ob elektrodinamicheskom sostoyanii prizemnoy atmosfery v usloviyakh aerazol'nogo zagryazneniya [Approximate analytical solution to the problem of the electrodynamic state of the surface atmosphere in aerosol pollution conditions], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severo-Kavkazskiy region. Estestvennye nauki* [Izvestia of higher educational institutions. North Caucasus region. Natural sciences], 2018, No. 2, pp. 84-89.
8. *Redin A.A., Klovo A.G., Kupovykh G.V.* Elektrodinamicheskaya model' atmosfernogo prizemnogo sloya [Electrodynamic model of the atmospheric surface layer], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2009, No. 8, pp. 93-106.
9. *Hoppel W.A.* Electrode effect: comparison of the theory and measurement, *In: Planetary Electrodynamics, 2*, S.C. Coroniti and J. Hughes; ed.: Gordon and Breach Science Publishers, New York, 1969, pp. 167-181.
10. *Kupovykh G.V.* Elektrichestvo prizemnogo sloya [Electricity of the surface layer], *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskiy region. Estestvennye nauki* [Izvestia of higher educational institutions, Sev.-Kav. reg., Estest. Sciences], 1995, No. 4, pp. 32-34.
11. *Redin A.A., Klovo A.G., Kupovykh G.V., Morozov V.N.* Generatsiya ob'emnogo zaryada vblizi poverkhnosti zemli s uchedom vzaimodeystviya aerazol'nykh chastits s aeroionami [Generation of volumetric charge near the earth's surface, taking into account the interaction of aerosol particles with aeroions], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severo-Kavkazskiy region. Estestvennye nauki. Spetsvypusk. Fizika atmosfery* [Izvestia of higher educational institutions. North Caucasus region. Natural sciences. Special issue. Atmospheric physics], 2010, pp. 81-85.
12. *Redin A.A., Klovo A.G., Kupovykh G.V.* Matematicheskoe modelirovanie elektrodinamicheskoy struktury prizemnogo sloya atmosfery v usloviyakh aerazol'nogo zagryazneniya [Mathematical modeling of the electrodynamic structure of the surface layer of the atmosphere under aerosol pollution conditions], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2009, No. 7 (96), pp. 192-200.
13. *Kupovykh G.V., Boldyrev A.S., Litvinova I.S., Marchenko A.G.* O svyazi elektricheskogo polya s ob'emnym zaryadom v prizemnom sloe atmosfery [On the connection of an electric field with a volumetric charge in the surface layer of the atmosphere], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severo-Kavkazskiy region. Estestvennye nauki. Prilozhenie № 3* [Izvestia of higher educational institutions. North Caucasus region. Natural sciences. Appendix No. 3], 2003, pp. 42-45.
14. *Hoppel W.A., Frick G.M.* Ion-Aerosol Attachment Coefficients and the Steady-State Charge Distribution on Aerosols in a Bipolar Ion Environment, *Aerosol Science and Technology*, 1986, 5:1, pp. 1-21.
15. *Hoppel W.A.* Ionaerosol attachment, ion depletion and charge distribution on aerosols, *J. Geoph. Res.*, 1985, Vol. 90, No. D4, pp. 5917-5923.
16. *Kupovykh G., Redin A., Boldyreff A.* Modeling of ionization-recombination processes in the atmospheric surface layer, *Journal of Electrostatics 71*. Elsevier B.V., 2013, pp. 305-311.
17. *Kupovykh G.V., Timoshenko D.V., Klovo A. G., Kudrinskaya T.V.* Electrodynamic processes models in atmospheric surface layer, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, Vol. 698 044034, 8 p.
18. *Kudrinskaya T.V., Kupovykh G.V., Redin A.A.* Issledovaniya ionizatsionnogo sostoyaniya prizemnogo sloya atmosfery v raznykh geofizicheskikh usloviyakh [Studies of the ionization state of the surface layer of the atmosphere in different geophysical conditions], *Meteorologiya i gidrologiya* [Meteorology and hydrology], 2018, No. 4, pp. 77-85.

19. *Shuleykin V.N., Shchukin G.G., Kupovykh G.V. Razvitie metodov i sredstv prikladnoy geofiziki – atmosferno-elektricheskiy monitoring geologicheskikh neodnorodnostey i zon geodinamicheskikh protsessov [Development of methods and means of applied geophysics - atmospheric and electrical monitoring of geological heterogeneities and zones of geodynamic processes]. Saint Petersburg: RGGMU, 2015, 206 p.*
20. *Kupovykh G.V., Kudrinskaya T.V., Gritsov V.V. The atmosphere electrical characteristics' monitoring as an element of technosphere safety, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020. 913 052041, 6 p.*

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н., профессор А.И. Жорник.

Куповых Геннадий Владимирович – Южный федеральный университет; e-mail: kupovykh@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +78634371636; кафедра высшей математики; зав. кафедрой; д.ф.-м.н.; профессор.

Клово Александр Георгиевич – e-mail: agklovo@sfedu.ru; тел.: +78634371636; кафедра высшей математики; к.ф.-м.н.; доцент.

Гривцов Владимир Владиславович – e-mail: agklovo@sfedu.ru; тел.: +78634371794; кафедра инженерной графики и компьютерного дизайна; к.т.н.; доцент.

Белюсова Ольга Васильевна – e-mail: obelousova@sfedu.ru, тел.: +78634371636; кафедра высшей математики, ассистент.

Kupovkh Gennady Vladimirovich – Southern Federal University; e-mail: kupovykh@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371636; the department of weisssch mathematics, department; dr. of phis.-math. sc.; professor.

Klovo Alexander Georgievich – e-mail: agklovo@sfedu.ru; phone: +78634371636; the department of vyshinsky mathematics; cand. of phis.-math. sc.; associate professor.

Gritsov Vladimir Vladislavovich – e-mail: agklovo@sfedu.ru; phone: +78634371794; the department of engineering graphics and computer design; cand. of eng. sc.; associate professor.

Belousova Olga Vasilievna – e-mail: obelousova@sfedu.ru; phone: +78634371636; the department of the highest mathematician; assistant.

УДК 621.373.1

DOI 10.18522/2311-3103-2022-3-243-254

А.М. Пилипенко, А.В. Агабекян

МОДЕЛЬ АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНОЙ ЦЕПИ ДЛЯ ТЕСТИРОВАНИЯ МЕТОДОВ ЧИСЛЕННОГО АНАЛИЗА ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В SPICE-СИМУЛЯТОРАХ

В настоящее время задача разработки методов численного анализа радиотехнических цепей во временной области остается актуальной, поскольку известные методы Гира и трапеций, использующиеся в SPICE-симуляторах, имеют ряд существенных недостатков. Для оценки эффективности новых численных методов необходимы специальные тестовые задачи, позволяющие определить точность методов в различных режимах работы. Численный анализ автоколебательных цепей во временной области представляет наибольшие трудности для программ схемотехнического моделирования (SPICE-симуляторов), поскольку модели таких цепей могут быть осциллирующими и жесткими одновременно. Целью данной работы является создание модели автоколебательной цепи, позволяющей количественно оценить точность методов численного анализа переходных процессов в SPICE-симуляторах. В соответствии с поставленной целью в работе были решены следующие задачи: исследованы особенности численного анализа классических моделей автогенераторов в SPICE-симуляторах; описана обобщенная математическая модель автоколебательных цепей; предложена универсальная схемная модель автоколебательных цепей для SPICE-симуляторов; проведена количественная оценка точности методов численного анализа переходных процессов в SPICE-симуляторах. Предлагаемая в дан-