

УДК 551.594

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО ЭЛЕКТРОДНОГО ЭФФЕКТА В АТМОСФЕРЕ В УСЛОВИЯХ РАЗВИТОГО ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ

Болдырева К.А., Болдырев А.С.

Южный федеральный университет, Таганрог, Россия (Ростовская область, 347928, г. Таганрог, ГСП-17А, пер. Некрасовский, 44), e-mail: boldyrev@sfedu.ru

В работе поставлена задача моделирования электродного эффекта в приземном слое атмосферы в условии сильного турбулентного перемешивания. Разработана и численно реализована модель электродного эффекта в приземном слое атмосферы в условии сильного турбулентного перемешивания. Определены начальные и граничные условия. В результате расчетов получены распределения электрических характеристик. Показано, что при увеличении степени турбулентного перемешивания происходит уменьшение величины электродного эффекта во всем электродном слое. Толщина электродного слоя в 3–4 раза больше полученного при слабом турбулентном перемешивании. Сделан вывод, что в случае сильного турбулентного перемешивания в атмосфере распределение электрических величин в приземном слое определяется в основном турбулентной диффузией.

Ключевые слова: электродный эффект, модель, атмосфера, турбулентность.

MODELING OF TIME-DEPENDENT ELECTRODE EFFECT IN ATMOSPHERE UNDER STRONG TURBULENCE CONDITION

Boldyreva K.A., Boldyrev A.S.

Southern Federal University, Taganrog, Russia (Rostov region, 347928, Taganrog, GSP-17A, Nekrasovsky, 44), e-mail: boldyrev@sfedu.ru

The problem of modeling of electrode effect in the atmospheric surface layer under strong turbulent mixing is formulated. The model of electrode effect in the atmospheric surface layer under strong turbulent mixing is developed and numerically realized. The initial and boundary conditions for equations were determined. Variations of the electrical parameters were received during modelling calculations. It was showed that increasing of turbulent mixing leads to decreasing of electrode effect value in the whole electrode layer. The thickness of electrode layer is in 3-4 times more than results, received under weak turbulent mixing. It was concluded that distribution of electrical values under strong turbulent mixing is determined mainly by turbulent diffusion.

Keywords: electrode effect, model, atmosphere, turbulence.

В регулярных наблюдениях за атмосферным электричеством используются среднечасовые значения величин, в связи с чем применимость стационарных моделей представляется оправданной. При решении специальных задач, которые могут быть связаны с выделением короткопериодических вариаций атмосферного электрического поля, необходимо учитывать нестационарность электродинамических процессов в приземном слое. Рассматриваемая задача решается для случая нестационарного электродного эффекта в условии сильного турбулентного перемешивания.

Модель нестационарного электродного эффекта в приближении турбулентного перемешивания впервые рассматривалась в работе Latham D.G. и Poor H.W [7]. Исходными уравнениями модели являлись уравнения баланса для концентрации легких ионов и уравнение Пуассона, при этом вводились следующие упрощения: коэффициент турбулентной диффузии, плотность полного тока и профиль интенсивности ионообразования

задавались постоянными. В качестве начальных и граничных использовались стационарные условия, аналогичные классическому электродному эффекту, что не совсем правомерно. В результате моделирования получено, что время установления электрической структуры составляет приблизительно 15 мин. и возрастает при увеличении значения коэффициента турбулентного переноса.

Задача об электродном эффекте в приближении сильного турбулентного перемешивания с учетом слоя молекулярной диффузии рассматривалась в работе J.C. Willet [8]. Решение уравнений сначала находилось в этом слое, а затем «сшивалось» с решением в области действия турбулентной диффузии. Сравнение результатов показывает, что такая подробная детализация задачи вблизи поверхности не приводит к каким-либо существенным отличиям в решении. Таким образом, можно считать вполне достаточным решение задачи в области действия турбулентной диффузии с введением параметра z_0 . Решение задачи в постановке работы [8] необходимо, когда масштаб шероховатости становится значительным (порядка 0,1-1 м). Такую задачу рассмотрел J.C. Willet в работе [9].

Постановка задачи моделирования электрического состояния приземного слоя в приближении сильного турбулентного перемешивания, а также аналитическое решение рассматривалось в работах Куповых Г.В., Морозова В.Н., Шварца Я.М. [4].

Электродинамическая структура приземного слоя атмосферы характеризуется наличием в нем электродного эффекта вблизи поверхности земли. Известно, что в зависимости от метеорологических условий рассматриваются два крайних случая: классический (в отсутствие турбулентного перемешивания) и турбулентный электродный эффект [4]. Теоретические оценки выявили [1; 4], что при значении безразмерного параметра $\xi_{1,2} \ll 1$ (при скорости приземного ветра 4-5 м/с) реализуется случай, когда распределение аэроионов определяется только турбулентной диффузией [4; 5]. В этом случае система электродинамических уравнений, описывающих состояние приземного слоя атмосферы в условиях сильного турбулентного перемешивания, имеет вид:

$$\frac{\partial n_{1,2}}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial z} \left(D_T(z) \frac{\partial n_{1,2}}{\partial z} \right) = q - \alpha n_1 n_2,$$

$$\frac{\partial E}{\partial t} - D_T(z) \frac{\partial^2 E}{\partial z^2} + \frac{1}{\epsilon_0} \lambda(z) E = \frac{1}{\epsilon_0} j_0,$$

(1)

где $n_{1,2}$ – объемная концентрация легких ионов (аэроионов), E – напряженность электрического поля, $D_T(z,t) = \chi(z,t) = D_I \times z$ – коэффициенты турбулентной диффузии легких и тяжелых ионов соответственно, $q(z,t)$ – интенсивность ионообразования, α – коэффициент рекомбинации легких ионов.

Начальные и граничные условия задаются в виде:

$$n_{1,2}(z)|_{t=0} = \sqrt{\frac{q}{\alpha}} \left(1 - e^{-\frac{z-z_0}{l_1}} \right),$$

$$E(z)|_{t=0} = E_0, \quad n_{1,2}(z)|_{z=z_0} = 0, \quad (2)$$

$$n_{1,2}(z)|_{z=l} = \sqrt{\frac{q}{\alpha}}, \quad \frac{\partial E}{\partial z}|_{z=z_0} = 0, \quad E(z)|_{z=l} = \frac{j_0}{\lambda_\infty}.$$

где $l_1 = D_I \cdot \tau$ – характерная толщина турбулентного электродного слоя (оценочное значение $l_1 \approx 25$ м) при $D_I = 0,1$ м/с, $\tau = 250$ с, $q = 7 \cdot 10^6$ м³с⁻¹ и $\alpha = 1,6 \cdot 10^{-12}$ м³с⁻¹, $z_0 = 2,5 \cdot 10^{-3}$ м, $j_0 = 2 \cdot 10^{-12}$ А/м², $E_0 = -100$ В/м.

В случае нейтральной стратификации выражение для определения связи коэффициента турбулентного перемешивания D_I со скоростью ветра u примет вид [4]:

$$D_1 = \frac{\chi^2 u}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}, \quad (3)$$

где $\chi = 0,43$ – постоянная Кармана.

В таком случае скорость ветра становится единственным метеорологическим параметром, определяющим изменчивость электрических параметров в электродном слое. Концентрация ионов не зависит от напряженности электрического поля, а определяется только турбулентным обменом, процессами ионизации и рекомбинации. При $u \rightarrow 0$ имеет место классический электродный эффект [4]. При термически неустойчивой стратификации приземного слоя электрические параметры зависят также и от параметров, характеризующих неустойчивую стратификацию приземного слоя. В таблице 1 приведены численные значения параметров $\xi_{1,2}$, от u , D_I и напряженности электрического поля E_∞ .

Таблица 1. Значения параметров $\xi_{1,2}$ при различных значениях скорости ветра u , коэффициента турбулентного перемешивания D_I и напряженности электрического поля E_∞

$z = 2 \text{ м} / u(\text{м/с})$	D_I (м/с)	$E_\infty = 100 \text{ В/м}$	$E_\infty = 50 \text{ В/м}$
		$\xi_{1,2}$	$\xi_{1,2}$
1	0,02	0,6	0,3
2	0,05	0,24	0,12
3	0,07	0,18	0,09
4	0,09	0,14	0,07
5	0,11	0,11	0,05
6	0,13	0,08	0,04

Для численного решения системы уравнений (1) с начальными и граничными условиями (2) вводится сетка по переменной z и по переменной t . Для записи системы уравнений (1) с начальными и граничными условиями (2) в конечно-разностном виде используется однопараметрическое семейство схем с весами. Полученная матрица решается методом прогонки с выполнением необходимых требований к этому методу по устойчивости и сходимости.

Полученные результаты численного моделирования представлены в таблице 2. Расчеты проведены для случая нейтральной стратификации ($L_I = 15 \text{ м}$) и термически неустойчивой ($L_{A/3} = 120 \text{ м}$). Примером могут служить профили, приведенные на рис. 1 и 2.

Таблица 2. Значение электрических характеристик вблизи поверхности земли при сильном турбулентном перемешивании

Параметры	Значение	Параметры	Значение
$t_{ust}, \text{ с}$	700	$n_2(1)/n_2(\infty)$	0,60
$L, \text{ м}$	95,20	$n_2(2)/n_2(\infty)$	0,71
$n_{1,2}(\infty) \cdot 10^9, \text{ м}^{-3}$	2,04	$-E_\infty, \text{ В/м}$	48,74
$n_I(0,5)/n_I(\infty)$	0,66	E_0/E_∞	2,05
$n_I(1)/n_I(\infty)$	0,75	$E_0/E(0,5)$	1,03
$n_I(2)/n_I(\infty)$	0,83	$E_0/E(1)$	1,07

$n_2(0,5)/n_2(\infty)$	0,49	$E_0/E(2)$	1,13
------------------------	------	------------	------

Обозначения: $n_{1,2}(z)$, $E(z)$, – значения на высоте z ; $n_{1,2}(\infty)$, E_∞ – значения на верхней границе электродного слоя.

Анализ полученных результатов показывает, что при увеличении степени турбулентного перемешивания происходит уменьшение величины электродного эффекта во всем электродном слое менее чем на 5%, причем с увеличением высоты с 0,5 м до 2 м его величина также возрастает приблизительно на 10%, однако этот процесс происходит медленнее. С увеличением высоты с 0,5 м до 2 м значения $n_1(z)/n_1(\infty)$ возрастают более чем на 25%, $n_2(z)/n_2(\infty)$ увеличиваются более чем на 40%. Толщина электродного слоя в рассматриваемом случае достигает 90 м, что в 3–4 раза больше полученного при слабом турбулентном перемешивании [2; 3; 5; 6].

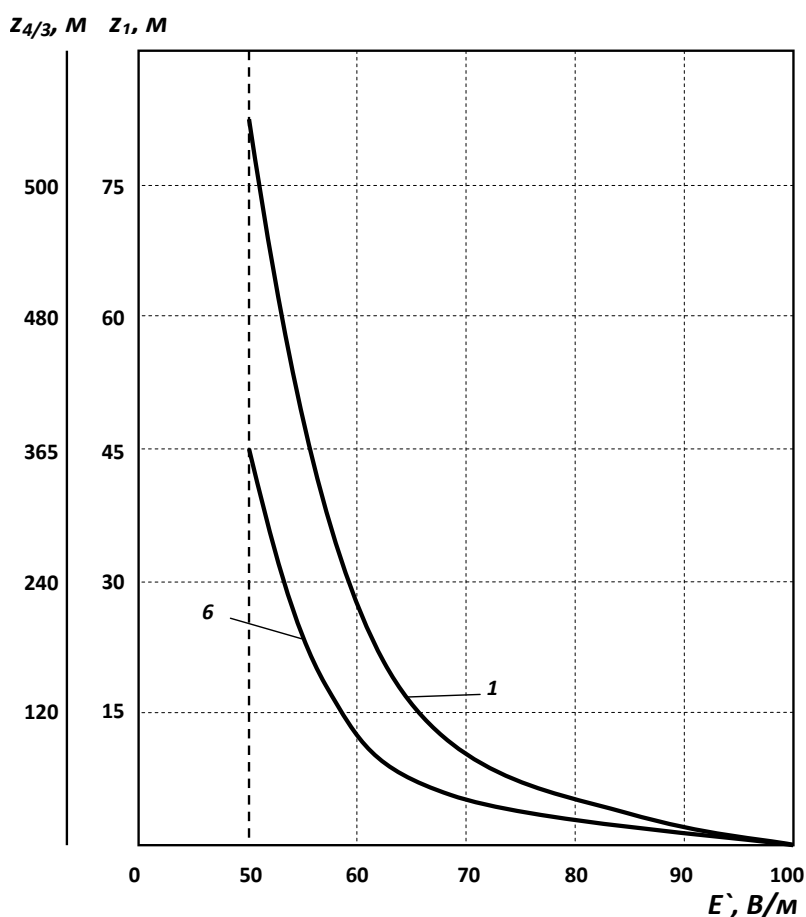


Рис. 1. Полученные профили напряженности поля E .

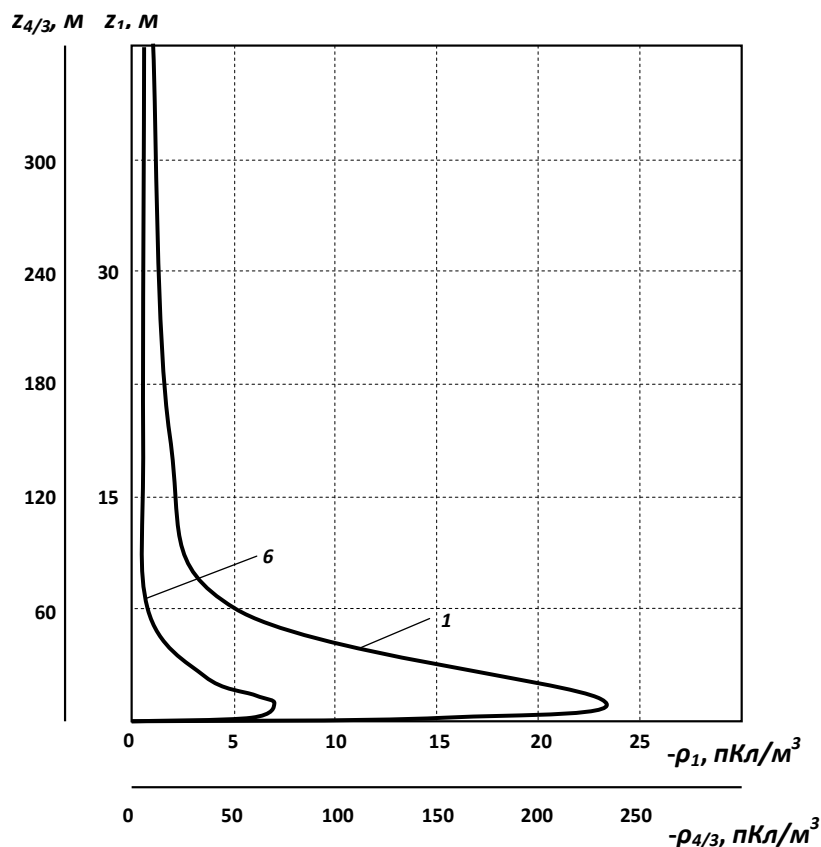


Рис. 2. Полученные профили плотности объемного заряда ρ .

Из рисунка видно, что напряженность электрического поля характеризуется уменьшением начального значения E_0 с увеличением толщины турбулентного электродного слоя L_m . Для распределения плотности объемного заряда характерно увеличение максимального значения вблизи земной поверхности для термически неустойчивой стратификации с уменьшением в случае нейтральной стратификации.

Таким образом, в случае сильного турбулентного перемешивания в атмосфере распределение электрических величин в приземном слое определяется в основном турбулентной диффузией. Характерная толщина электродного слоя определяется параметром L_m . При этом толщина растет с увеличением турбулентного перемешивания в атмосфере.

Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки (Соглашение № 14.132.21.1381 от 10.10.2012) и Гранта Президента РФ молодым ученым-кандидатам наук (14.125.13.1069 от 04.02.13).

Список литературы

1. Болдырев А.С., Клово А.Г., Куповых Г.В. О взаимодействии аэрозольных частиц с аэроионами в приземном слое атмосферы // Известия Южного федерального университета. Технические науки. - 2006. - Т. 64. - № 9-2. - С. 63-64.

2. Кудринская Т.В., Болдырева К.А., Новикова О.В., Пестов Д.А., Болдырев А.С., Редин А.А., Князева З.М. Исследование вариаций атмосферного электрического поля на разных уровнях у земли // Научная мысль Кавказа. - 2012. - № 4. - С. 95-98.
3. Куповых Г.В., Морозов В.Н., Шварц Я.М. Теория электродного эффекта в атмосфере. – Таганрог : ТРТУ, 1998. - 123 с.
4. Редин А.А., Куповых Г.В., Клово А.Г., Болдырев А.С. Математическое моделирование электродинамических процессов в приземном слое в условиях аэрозольного загрязнения атмосферы // Известия Южного федерального университета. Технические науки. - 2011. - Т. 121. - № 8. - С. 111-121.
5. Boldyreff A., Kupovykh G., Redin A. Modeling of ionization-recombination processes in the atmospheric surface layer // Journal of Electrostatics. Elsevier. - 2013. - 71. - P. 305-311.
6. Boldyrev A., Kupovykh G., Redin A. Surface Layer Electrodynamical Structure According to the Meteorological State. ICECT 2010 - Proceedings of the 2010 2nd International Conference on Electronic Computer Technology 2010 International Conference on Electronic Computer Technology, ICECT 2010. sponsors: Int. Assoc. Comput. Sci. Inf. Technol. (IACSIT). Kuala Lumpur, 2010. С. 247-251.
7. Latham D.G., Poor H.W. A Timedependent Model of the Electrode Effect // Journal of Geophysical Research. - 1972. - V. 77, N 15. - P. 2669-2676.
8. Willet J.C. An Analysis of the Electrode Effect in the Limit of Strong Turbulent Mixing // Journal of Geophysical Research. - 1978. - V. 83. - P. 402-408.
9. Willet J.C. The Turbulent Electrode Effect as Influenced by Interfacial Ion Transfer // Journal of Geophysical Research. - 1983. - V. 88. - P. 8453-8469.

Рецензенты:

Илюхин А.А., д.ф-м.н., профессор, профессор кафедры математического анализа Таганрогского государственного педагогического института имени А.П. Чехова, г. Таганрог.
Жорник А.И., д.ф-м.н., профессор, профессор кафедры теоретической, общей физики и технологии Таганрогского государственного педагогического института имени А.П. Чехова, г. Таганрог.