

УДК 551.594

Т.В. Кудринская, Г.В. Куповых, А.А. Редин

СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОДНОГО ЭФФЕКТА С ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМИ ДАННЫМИ

Приведена нестационарная электродинамическая модель атмосферного турбулентного приземного слоя с учетом многократно заряженных аэрозольных частиц. Для численного решения задачи использовалась схема с «двумя весами». Доказана устойчивость, сходимость и консервативность используемых схем. На основании экспериментальных наблюдений выделены условия, удовлетворяющие классическому и турбулентному электродному эффекту, и произведена оценка согласия полученных модельных расчетов с экспериментальными данными.

Моделирование; эксперимент; приземный слой атмосферы; аэрозоль; ионы; турбулентное перемешивание; электродный эффект; электрическое поле.

T.V. Kudrinskaya, G.V. Kupovykh, A.A. Redin

THE COMPARISON OF RESULTS OF THE ELECTRODE EFFECT MATHEMATICAL MODELING WITH THE OBSERVATIONAL DATA

The non-stationary electrodynamic model of the atmosphere turbulence surface layer with multi-charged aerosol particles is developed in this work.

For the computation solution of the task under consideration the “two scales” circuit is used. The stability, repeatability and persistence of the employed circuit are demonstrated. On the basis of experimental observation the conditions complying with the classical and turbulent electrode effect are specified and the conformance evaluation of the collected model analysis with the experimental information is carried out.

Modeling; experiment; lowest atmospheric layer; aerosol; ions; turbulent mixing; electrode effect; electric field.

Теоретическое исследование. В теории атмосферного электричества под проблемой “электродного эффекта” обычно понимается задача о нахождении распределений по высоте объемных концентраций положительных и отрицательных легких ионов и напряженности электрического поля вблизи поверхности земли [1].

Электрическая структура приземного слоя формируется под действием электродного эффекта [1], который определяет изменение электрических характеристик вблизи земной поверхности. В зависимости от метеорологического режима атмосферы можно выделить два случая: классический (нетурбулентный) и турбулентный электродный эффект. Широкое использование модельных исследований электродного эффекта в атмосферном электричестве делает особо актуальным сравнение теоретических расчетов с экспериментальными данными.

Для исследования электрической структуры приземного слоя атмосферы применяются различные математические модели, позволяющие получать пространственно-временные распределения атмосферно-электрических параметров в зависимости от степени ионизации воздуха, напряженности электрического поля, размера аэрозольных частиц и т.д.

В общем случае математическая модель электродного эффекта конвективно-турбулентного приземного слоя в условиях «чистой» атмосферы имеет вид [2]

$$\frac{\partial n_{1,2}}{\partial t} \pm \frac{\partial}{\partial z} (b_{1,2} \cdot n_{1,2} \cdot E) - \frac{\partial}{\partial z} \left(D_T(z) \cdot \frac{\partial n_{1,2}}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} (v(z) \cdot n_{1,2}) = q(z) - \alpha n_1 n_2,$$

$$\frac{\partial E}{\partial z} = \frac{e}{\epsilon_0} (n_1 - n_2), \quad (1)$$

где $n_{1,2}$ – объемная концентрация легких ионов (аэроионов); $b_{1,2}$ – их подвижность, E – напряженность электрического поля; $D_T(z)$ – коэффициенты турбулентной диффузии; $v(z)$ – вертикальная составляющая конвективного переноса; $q(z,t)$ – интенсивность ионообразования; α – коэффициент рекомбинации легких ионов; E_0 – значение напряженности электрического поля у поверхности земли.

Система уравнений (1) характеризуется тремя безразмерными параметрами, позволяющими в зависимости от условий в атмосфере корректно выбирать физическую модель для моделирования электродинамических процессов в приземном слое

$$\xi_{1,2} = \frac{|b_{1,2}|E_\infty}{D_1}, \quad \chi = \frac{v}{D_1}, \quad \gamma = \frac{en_\infty D_1 \tau}{\varepsilon_0 E_\infty}.$$

При $\chi \ll 1$ конвективным переносом аэроионов можно пренебречь. Тогда при $\xi_{1,2} < 1$ имеем турбулентный электродный эффект [3]:

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

Если $\xi_{1,2} \geq 1$, то имеет место приближение классического электродного эффекта [4]:

$$\frac{\partial n_{1,2}}{\partial t} \pm b_{1,2} \frac{\partial (E \cdot n_{1,2})}{\partial z} = q(z) - \alpha n_1 n_2, \quad \frac{\partial E}{\partial z} = \frac{e}{\varepsilon_0} (n_1 - n_2). \quad (3)$$

При наличии в атмосфере многократно заряженных аэрозольных частиц, когда объемный электрический заряд в приземном слое генерируется как легкими, так и тяжелыми ионами, может быть использована следующая электродинамическая модель [1, 5]:

$$\begin{aligned} \frac{dn_{1,2}}{dt} - \frac{\partial}{\partial z} \left(D_T(z) \frac{dn_{1,2}}{dz} \right) \pm \frac{\partial}{\partial z} (b_{1,2} n_{1,2} E) &= q(z) - \alpha n_1 n_2 - n_{1,2} \Phi_{1,2}, \\ \frac{dN_0}{dt} - \frac{d}{dz} \left(D_T(z) \frac{dN_0}{dz} \right) &= G_0(z), \\ \frac{dN_{1,2}}{dt} - \frac{d}{dz} \left(D_T(z) \frac{dN_{1,2}^{(k)}}{dz} \right) + \frac{d}{dz} I_{z,1,2}^{(k)} &= G_{1,2}^{(k)}, \quad I_{z,1,2}^{(k)} = B_{1,2}^{(k)} \cdot N_{1,2}^{(k)} \cdot E, \quad \frac{dE}{dz} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}, \\ \Phi_1 &= \int \sum_{r=0}^{\rho-1} \beta_{11}^{(k)}(r) N_1^{(k)}(r) dr + \int \sum_{r=1}^{\rho} \beta_{12}^{(k)}(r) N_2^{(k)}(r) dr, \\ \Phi_2 &= \int \sum_{r=0}^{\rho-1} \beta_{22}^{(k)}(r) N_2^{(k)}(r) dr + \int \sum_{r=1}^{\rho} \beta_{21}^{(k)}(r) N_1^{(k)}(r) dr, \\ G_0 &= n_1 \beta_{12}^{(1)} N_2^{(1)} + n_2 \beta_{21}^{(2)} N_1^{(1)} - n_1 \beta_{10}^{(0)} N_0 - n_2 \beta_{20}^{(0)} N_0, \\ G_1^{(k)} &= n_1 \beta_{11}^{(k-1)} N_1^{(k-1)} - n_1 \beta_{11}^{(k)} N_1^{(k)} + n_2 \beta_{21}^{(k+1)} N_1^{(k+1)} - n_2 \beta_{21}^{(k)} N_1^{(k)}, \\ G_2^{(k)} &= n_2 \beta_{22}^{(k-1)} N_2^{(k-1)} - n_2 \beta_{22}^{(k)} N_2^{(k)} + n_1 \beta_{12}^{(k+1)} N_2^{(k+1)} - n_1 \beta_{12}^{(k)} N_2^{(k)}, \\ \rho &= e(n_1 - n_2) + e \int \left(\sum_{k=1}^m k N_1^{(k)} - \sum_{k=1}^m k N_2^{(k)} \right) dr, \end{aligned} \quad (4)$$

где $N_0(r)$ – функция распределения нейтральных аэрозольных частиц по радиусу r ; $N_i^{(k)}(r)$ – функции распределения заряженных аэрозольных частиц; $B_i^{(k)}$ – их подвижности; $\beta_{ij}^{(k)}$ – коэффициенты присоединения легкого иона полярности i к аэрозольной частице полярности j , имеющей m – количество элементарных электрических зарядов и радиус r .

В случае, когда концентрация аэрозольных частиц не очень велика, потоками заряженных частиц аэрозоля $I_{z,1,2}^{(k)}$ в электрическом поле можно пренебречь [6], тогда система (4) записывается в виде

$$\begin{aligned}
 & N_0 + \sum_{k=1}^m N_1^{(k)} + \sum_{k=1}^m N_2^{(k)} = N = \text{const}, \\
 & \frac{\partial N_1^{(k)}}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial z} \left(\chi(z, t) \frac{\partial N_1^{(k)}}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} (v_2(z, t) \cdot N_1^{(k)}) = n_1 \beta_{11}^{(k-1)} N_1^{(k-1)} - n_1 \beta_{11}^{(k)} N_1^{(k)} + \\
 & + n_2 \beta_{21}^{(k+1)} N_1^{(k+1)} - n_2 \beta_{21}^{(k)} N_1^{(k)}, \\
 & \frac{\partial N_2^{(k)}}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial z} \left(\chi(z, t) \frac{\partial N_2^{(k)}}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} (v_2(z, t) \cdot N_2^{(k)}) = n_2 \beta_{22}^{(k-1)} N_2^{(k-1)} - n_2 \beta_{22}^{(k)} N_2^{(k)} + \\
 & + n_1 \beta_{12}^{(k+1)} N_2^{(k+1)} - n_1 \beta_{12}^{(k)} N_2^{(k)}, \\
 & \frac{\partial n_1}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} (b_1 E n_1) - \frac{\partial}{\partial z} \left(D_T(z, t) \frac{\partial n_1}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} (v_1(z, t) \cdot n_1) = q(z, t) - \alpha n_1 n_2 - \\
 & - n_1 \sum_{k=0}^{m-1} \beta_{11}^{(k)} N_1^{(k)} - n_1 \sum_{k=1}^m \beta_{12}^{(k)} N_2^{(k)}, \\
 & \frac{\partial n_2}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial z} (b_2 E n_2) - \frac{\partial}{\partial z} \left(D_T(z, t) \frac{\partial n_2}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} (v_1(z, t) n_2) = q(z, t) - \alpha n_1 n_2 - \\
 & - n_2 \sum_{k=0}^{m-1} \beta_{22}^{(k)} N_2^{(k)} - n_2 \sum_{k=1}^m \beta_{21}^{(k)} N_1^{(k)}, \\
 & \frac{\partial E}{\partial z} = \frac{e}{\epsilon_0} \left(n_1 - n_2 + \sum_{k=1}^m k N_1^{(k)} - \sum_{k=1}^m k N_2^{(k)} \right). \tag{5}
 \end{aligned}$$

Начальные и граничные условия имеют вид:

– для легких ионов:

$$\begin{aligned}
 n_{1,2}(t=0) &= \frac{-BN + ((BN)^2 + 4\alpha q)^{1/2}}{2\alpha} \left(1 - e^{-\frac{(z-z_0)}{L_0}} \right), \\
 n_{1,2}(z=z_0) &= 0, \quad n_{1,2}(z=l) = \frac{-BN + ((BN)^2 + 4\alpha q)^{1/2}}{2\alpha}, \tag{6}
 \end{aligned}$$

– для тяжелых ионов и электрического поля:

$$\begin{aligned}
 N_{1,2}^{(k)}(t=0) &= B_k, \quad \left(\frac{\partial N_{1,2}^{(k)}}{\partial z} \right)_{z=z_0} = 0, \quad N_{1,2}^{(k)}(z=l) = B_k, \\
 E(t=0) &= E_0, \quad E(z=z_0) = E_0. \tag{7}
 \end{aligned}$$

Для рассматриваемых экспериментальных условий более всего подходит математическая модель (5)–(7).

Численная модель электродинамики атмосферного приземного слоя представляет собой двухслойную конечно-разностную схему, полученную при помощи интегроинтерполяционного метода [7]. Использование параметров $\sigma_{1,2} \in [0,1]$ дает возможность выбирать оптимальную схему для конкретных физических и метеорологических условий [6], которая является устойчивой, консервативной и обладает свойством сходимости.

Для компьютерной реализации рассмотренной математической модели используется объектно-ориентированный язык программирования высокого уровня C#, так как он позволяет эффективно решать сложные задачи математического моделирования [8].

Экспериментальное исследование. Для сравнительного анализа привлекался экспериментальный материал, полученный в экспедиционных исследованиях в типичном сельскохозяйственном районе Ростовской области (х. Талловы, х. Платов) в летние месяцы. Комплекс измерений включал одновременные градиентные измерения атмосферно-электрических (удельной электрической проводимости атмосферы, градиента потенциала электрического поля, объемной активности радона-222) и метеорологических параметров (температуры почвы и воздуха, скорости ветра) [9].

Экспериментальные исследования электродного слоя атмосферы позволяют на основании профильных наблюдений атмосферно-электрических характеристик структурировать данные в зависимости от метеорологического режима атмосферы. На основании данных наблюдений можно выделить условия, удовлетворяющие классическому и турбулентному электродному эффекту, и оценить согласие полученных модельных расчетов с экспериментальными данными.

Чаще всего в модельных расчетах электродного эффекта для вертикального распределения функции интенсивности ионообразования используется представление экспоненциальной зависимости, приведенное в [1]:

$$q(z) = q_c + Q_0 \cdot e^{-2.362z},$$

где $q_c = 7 \cdot 10^6$ пар ионов/ $\text{м}^3\text{с}$ – интенсивность ионизации, обусловленная космическими лучами (не изменяется по высоте); $Q_0 = 4,8 \cdot 10^6$ п.и./ $\text{м}^3\text{с}$ – концентрация радиоактивного вещества на уровне земной поверхности.

Известно [10], что основным ионизатором атмосферы вблизи земной поверхности является α -радиоактивная эманация радия – радон (${}^{86}_{222}\text{Rn}$) и продукты его распада. Учитывая, что при α -распаде образуется в среднем $2 \cdot 10^5$ п.и./ $\text{м}^3\text{с}$, а $1 \text{ Бк}/\text{м}^3 = 1 \text{ распад}/\text{м}^3\text{с} = 2 \cdot 10^5$ п.и./ $\text{м}^3\text{с}$, то по известной концентрации радиоактивного элемента (радона-222) в воздухе можно вычислить соответствующую интенсивность ионизации под воздействием α -частиц. Таким образом, функцию интенсивности ионообразования, обусловленную радоном, можно определить на основании экспериментального распределения объемной активности радона-222 по высоте.

На основании многочасовых массивов экспериментальных данных объемной активности радона-222, полученных для разных пунктов наблюдений в степной зоне Ростовской области, получено распределение концентрации радона по высоте, хорошо описываемое экспоненциальной зависимостью. Выражение, описывающее функцию интенсивности ионообразования, можно представить в виде

$$q(z) = q_c + q_{Rn}(z) = q_c + (\dot{A} + C \cdot e^{-bz}) \text{ п.и./}\text{м}^3\text{с},$$

где $q_c = 7 \cdot 10^6$ п.и./м³с – интенсивность ионизации, обусловленная космическими лучами; A , b и C – постоянные, определяемые по экспериментальным данным и переведенные в п.и.

При моделировании классического электродного эффекта использовались следующие параметры системы, определяемые на основании эксперимента (табл. 1).

Таблица 1

Параметры моделирования классического электродного эффекта

Измерительный пункт	Коэффициент турбулентной диффузии, D , м ² /с	Напряженность электрического поля, E , В/м	Функция интенсивности ионообразования, $q(z)$, 10^6 п.и./м ³ с
х. Талловеров	0,0027	20	$q(z) = 16 + 5 \cdot e^{-1.93z}$
х. Платов	0,0034	20	$q(z) = 17 + 6 \cdot e^{-1.84z}$

Влияние метеорологических факторов в модельных расчетах учитывается посредством коэффициента турбулентной диффузии. Для задания вертикального профиля коэффициента турбулентного перемешивания применяется логарифмическая интерполяционная формула

$$D_T(z) = \frac{\chi^2}{\varphi_u^2} \cdot \frac{\Delta U_{z_2-z_1}}{\ln \frac{z_2}{z_1}} \cdot z,$$

где z_1 и z_2 – высоты, на которых проводятся градиентные измерения скорости горизонтального ветра (U); $\chi = 0,43$ – постоянная Кармана; φ_u – универсальная функция из теории подобия, зависящая от числа Ричардсона (Ri), т.е. определяемая стратификацией атмосферы.

При моделировании турбулентного случая в зависимости от скорости горизонтального ветра использовались следующие исходные параметры, приведенные в табл. 2.

Таблица 2

Параметры моделирования турбулентного электродного эффекта

Скорость ветра, U , м/с	Коэффициент турбулентной диффузии, D , м ² /с	Напряженность электрического поля, E , В/м	Функция интенсивности ионообразования, $q(z)$, 10^6 п.и./м ³ с
1	0,029	30	$q(z) = 13 + 3 \cdot e^{-1.5z}$
2	0,074	35	$q(z) = 10 + e^{-1z}$
3	0,096	25	$q(z) = 10 + e^{-0.5z}$
4	0,137	20	$q(z) = 10 + e^{-0.5z}$

Классический электродный эффект. Классический электродный эффект проявляется при отсутствии ветра, конвекции и облачности менее 3 баллов. По многочисленным наблюдениям можно сказать, что экспериментальные данные для случая устойчивой стратификации (с заметной температурной инверсией) при скорости ветра менее 1 м/с удовлетворяют условиям классического электродного

эффекта. С целью сравнения теории с экспериментом использовались осредненные часовые профили градиента потенциала электрического поля и полярных концентраций легких ионов для указанных выше условий.

Согласно модельным расчетам, с увеличением значений напряженности электрического поля вблизи поверхности растет толщина электродного слоя, увеличивается электродный эффект (E/E_∞). Подобное поведение можно проследить и по экспериментальным данным, полученным в одном из указанных пунктов Ростовской области в случае устойчивой стратификации при скорости горизонтального ветра менее 1 м/с. На рис. 1 представлен эмпирический регрессионный ряд E/E_∞ на высоте 1 м по величине напряженности электрического поля у земной поверхности (планками погрешности показана статистическая ошибка).

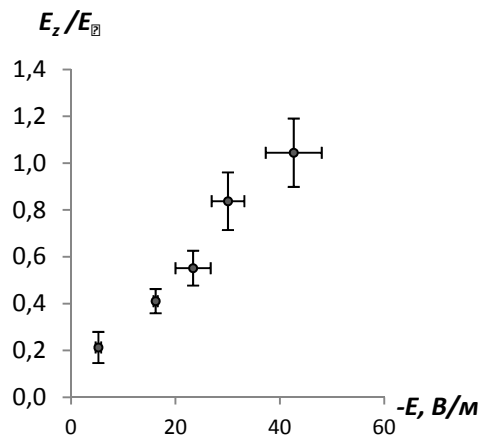


Рис. 1. Регрессионный ряд распределения E_z / E_∞ по значениям напряженности электрического поля у земной поверхности

Как известно [1], в случае классического электродного эффекта распределение атмосферно-электрических характеристик в приземном слое зависит от степени ионизации и величины напряженности электрического поля. Следует отметить, что при больших значениях интенсивности ионообразования (что имеет место для пунктов Ростовской области) слабое электрическое поле не будет оказывать воздействия на вертикальное распределение атмосферно-электрических величин, которое в этом случае будет в основном определяться функцией интенсивности ионообразования.

На рис. 2 представлены вертикальные профили концентрации легких положительных ионов, рассчитанные на основании описанной модели электродного эффекта, и для сравнения данные эксперимента для двух населенных пунктов Ростовской области.

Можно отметить, что экспериментальные значения несколько занижены по сравнению с теоретическими. Это обусловлено, скорее всего, присутствием аэрозоля, поскольку наличие аэрозолей приводит к образованию тяжелых ионов в результате адсорбции заряда легких ионов частицами аэрозоля.

Турбулентный электродный эффект. В этом случае распределение атмосферно-электрических характеристик в приземном слое обусловлено не только действием электрических сил, но и турбулентным переносом аэроионов.

Согласно модельным расчетам (для нейтральной стратификации), толщина электродного слоя растет с увеличением значений скорости ветра. В табл. 3 приведены значения $n_{1,2}/n_{\infty}$ и E/E_{∞} на высоте 1 м для диапазона скоростей ветра от 1 до 4 м/с, полученные на основании модельного расчета и экспериментальных данных.

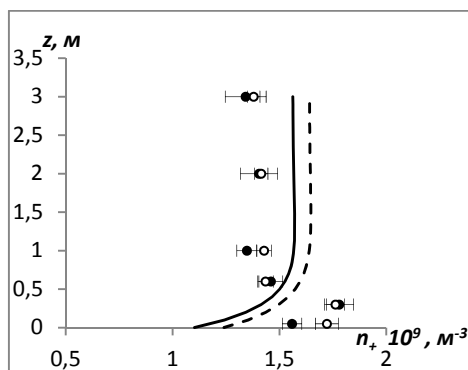


Рис. 2. Вертикальное распределение концентрации положительных легких ионов: расчетные (линии) и экспериментальные (точки) — х.Талловеров, - - - х.Платов

Таблица 3

Значения электрических характеристик вблизи поверхности земли в зависимости от скорости ветра при нейтральной стратификации

U (м/с)		1	2	3	4
n_1/n_{∞} , $z=1$ м	Модель	0,95	0,87	0,84	0,82
	Эксперимент	0,87	0,82	0,77	0,76
n_2/n_{∞} , $z=1$ м	Модель	0,89	0,80	0,78	0,77
	Эксперимент	0,59	0,55	0,53	0,53
E_0/E_{∞} , $z=1$ м	Модель	1,19	0,84	0,80	0,77
	Эксперимент	0,63	0,54	0,45	0,44

Подобную тенденцию снижения концентрации легких ионов на уровне 1 м при увеличении скорости горизонтального ветра можно проследить и по графикам (рис. 3).

С увеличением скорости горизонтального ветра концентрации легких ионов (как положительных, так и отрицательных) снижаются в среднем на 40–50 % при низких значениях скорости ветра ($U < 2$ м/с), в то время как при больших значениях скорости ветра ($U > 3$ м/с) этот эффект незначителен. Таким образом, можно отметить, что в случае турбулентного перемешивания значения $n_{1,2}/n_{\infty}$ вблизи поверхности земли практически не меняются, что совпадает с модельными расчетами.

Подтверждением подобного поведения могут служить закономерности вертикального распределения концентрации легких ионов. На рис. 4 приведены расчетные и экспериментальные профили легких положительных ионов для условий нейтральной стратификации атмосферы при различной скорости ветра. Заметно, что с увеличением скорости горизонтального ветра профили становятся близкими.

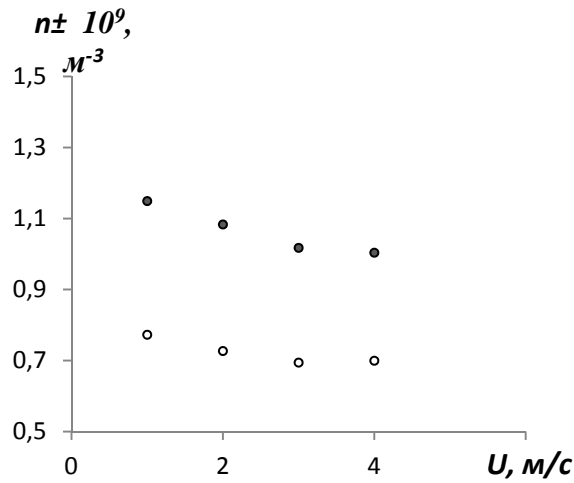


Рис. 3. Зависимость концентраций легких ионов положительных (а), отрицательных (б) от скорости горизонтального ветра (х. Платов Ростовской области)

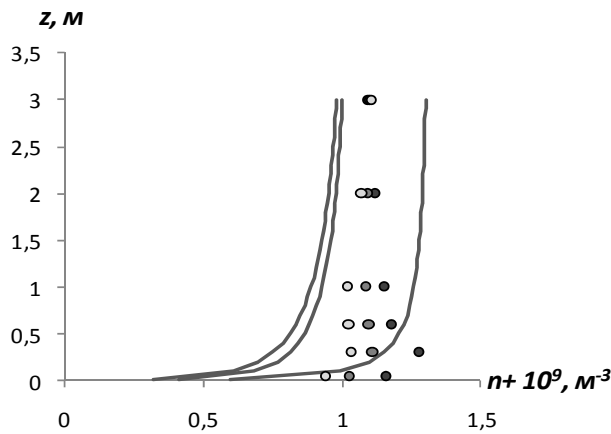


Рис. 4. Вертикальное распределение концентрации положительных легких ионов: расчетные (линии) и экспериментальные (точки) при разной скорости ветра: 1 – 1 м/с, 2 – 2 м/с, 3 – 3 м/с

Турбулентное перемешивание влияет на распределение объемных зарядов: условия устойчивой стратификации особенно при малых скоростях ветра (близких к 0 м/с) способствуют образованию объемного заряда, при увеличении турбулентной диффузии плотность объемного заряда уменьшается.

Таким образом, на основании вышеизложенного можно сделать вывод, что разработанные модели электродного эффекта адекватно описывают электрическое состояние приземного слоя атмосферы, так как получено хорошее согласие теории и эксперимента.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Куповых Г.В., Морозов В.Н., Шварц Я.М.* Теория электродного эффекта в атмосфере. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 1998. – 123 с.
2. *Редин А.А., Болдырев А.С., Клово А.Г., Куповых Г.В.* Моделирование электродинамических процессов в приземном слое атмосферы // Модели и алгоритмы для имитации физико-химических процессов: Материалы Междунар. науч.-техн. конф. ТГПИ. – Таганрог: Изд-во НП “ЦРЛ”, 2008. – С. 146-154.
3. *Куповых Г.В., Марченко А.Г., Морозов В.Н.* Электрическая структура нестационарного приземного слоя в приближении турбулентного электродного эффекта // Известия вузов. Сев.-Кав. регион. Естественные науки. Приложение. – 2005. – № 5. – С. 46-51.
4. *Куповых Г.В., Марченко А.Г., Морозов В.Н.* Электрическая структура нестационарного приземного слоя в приближении классического электродного эффекта // Известия вузов. Сев.-Кав. регион. Естественные науки. Приложение. – 2005. – № 4. – С. 31-37.
5. *Морозов В.Н.* Математическое моделирование атмосферно-электрических процессов с учетом влияния аэрозольных частиц и радиоактивных веществ. – СПб.: Изд-во РГГМУ, 2011. – 253 с.
6. *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 ЮФУ. Технические науки. – 2011. – № 8 (121). – С. 111-121.
7. *Самарский А.А., Гулин А.В.* Численные методы математической физики. – 2-е изд. – М.: Научный мир, 2003. – 316 с.
8. *Герберт Шилдт.* Полный справочник по С#: Пер. с англ. – М.: Изд. дом “Вильямс”, 2007. – 752 с.
9. *Петров А.И., Петрова Г.Г., Панчишкина И.Н., Кудринская Т.В.* Измерительный комплекс для исследования электричества приземного слоя атмосферы // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Физика атмосферы. Спецвыпуск. – 2010.
10. *Брикар Дж.* Влияние радиоактивности и загрязнений на элементы атмосферного электричества // Проблемы электричества атмосферы. – Л.: Гидрометеоиздат, 1969. – С. 68-105.

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

Кудринская Татьяна Владимировна – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южный федеральный университет»; e-mail: tkudrya@list.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634321617; кафедра физики; ассистент.

Куповых Геннадий Владимирович – e-mail: kupovykh@sfedu.ru; тел.: 88634371663; декан; д.ф.-м.н.; профессор.

Редин Александр Александрович – e-mail: alexandr.redin@gmail.com; тел.: 88634371663; кафедра физики; к.ф.-м.н.; доцент.

Kudrinskaya Tatyana Vladimirovna – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: tkudrya@list.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634321617; the department of physics; assistant.

Kupovykh Gennady Vladimirovich – e-mail: kupovykh@sfedu.ru; phone: +78634371663; dean; dr. of phis.-math. sc.; professor.

Redin Alexander Alexandrovich – e-mail: alexandr.redin@gmail.com; phone: +78634371663; the department of physics; cand. of phis.-math. sc.; associate professor.