

**ЗАРЯДКА ПРОВОДЯЩИХ ЧАСТИЦ  
В СЛАБОИОНИЗОВАННОЙ СТОЛКНОВИТЕЛЬНОЙ ПЛАЗМЕ,  
ХАРАКТЕРНОЙ ДЛЯ АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ**

**В.С. Грач**

**CHARGING OF THE CONDUCTIVE PARTICLES  
IN A WEAKLY IONIZED COLLISIONAL PLASMA TYPICAL FOR THE EARTH'S ATMOSPHERE**

**V.S. Grach**

Рассмотрено взаимодействие двух проводящих сфер со столкновительной слабоионизованной плазмой во внешнем поле. Предполагается, что плазма состоит из двух сортов ионов, влиянием электронов можно пренебречь. При анализе учитываются зарядка сферы вследствие оседания на ней ионов плазмы, поле заряда на сфере и пространственного заряда, процессы рекомбинации и молекулярная диффузия. Нестационарная задача о взаимодействии сфер с окружающей плазмой решается численными методами. Проанализирована временная динамика зарядов на сферах и возмущений в окружающей плазме, а также свойства стационарного состояния. Получены зависимости времени установления стационарного режима, стационарных зарядов на сферах и пространственных характеристик возмущенных областей в плазме от параметров плазмы, радиуса сфер и расстояния между ними. Приведены количественные оценки для различных областей атмосферы Земли.

We study the interaction of two conductive spheres with a weakly ionized collisional plasma under external electric field. Plasma is assumed to consist of positive and negative ions, electrons can be neglected. Charging of the spheres due to ion absorption, space charge influence and also molecular diffusion and ionization-recombination processes are taken into account. Resulting non-stationary problem is solved by numerically. Temporal dynamics of particle charge and ion densities in surrounding plasma is studied as well as the properties of the steady state. Sphere's stationary charges and temporal and space parameters of the plasma perturbation are obtained under different conditions. Quantitative estimates for different regions of the Earth's atmosphere are made.

Одним из основных направлений исследований пылевой плазмы являются процессы зарядки пылевых частиц. Без их четкого понимания невозможно объяснение важнейших эффектов, наблюдаемых в пылевой плазме – притяжения одноименно заряженных частиц, образования мелкокомасштабных упорядоченных структур и т. д.

Взаимодействие крупных частиц с ионами и электронами окружающей плазмы для различных условий рассматривалось как в кинетическом [Филиппов, 2007; Фортов, 2012], так и в гидродинамическом приближении [Babaeva, 2004, Sorokin, 2007, Грач, 2009]. Кинетическое приближение в основном используется для случая электрон-ионной бесстолкновительной плазмы. Гидродинамическое приближение используется при описании экспериментов газового разряда [Babaeva, 2004], а также при исследовании слабоионизованной столкновительной плазмы, характерной для атмосферных явлений [Sorokin, 2007, Грач, 2009]. В этом случае рассматриваются пылевые или аэрозольные частицы в плазме, состоящей из положительных ионов, отрицательных ионов и электронов; также возможно наличие внешнего электрического поля или потока нейтрального газа.

В большинстве теоретических работ рассматривается стационарное состояние системы, однако численное моделирование позволяет исследовать и временную динамику зарядки и получить оценки для характеристик установления стационарного режима.

Для плазмоподобных сред, характерных для атмосферных явлений, при наличии внешнего электрического поля в работах [Sorokin, 2007, Грач, 2009] анализировалось стационарное состояние при учете потока нейтрального газа [Sorokin, 2007] и при учете пространственного заряда и ионизационно-рекомбинационных процессов [Грач, 2009] (предпо-

лагалось, что электрическое поле не влияет на ионизацию плазмы). Влияние молекулярной диффузии не учитывалось.

В данной работе, являющейся непосредственным продолжением работы [Грач, 2009], представлено численное исследование временной динамики взаимодействия двух проводящих сфер с двухкомпонентной плазмой, состоящей из положительных и отрицательных ионов, во внешнем электрическом поле  $E_0$ . Предполагается, что сферы имеют одинаковый радиус и расположены на расстоянии  $L_p$  друг от друга вдоль электрического поля; случай далеко разнесенных сфер соответствует уединенной сфере. При рассмотрении учитываются поле пространственного заряда, ионизационно-рекомбинационные процессы (предполагается, что электрическое поле достаточно слабое и не влияет на ионизацию) и молекулярная диффузия. Исследуется сравнительное влияние взаимного расположения сфер, диффузии, ионизационно-рекомбинационных процессов и поля пространственного заряда на временную динамику системы, стационарный заряд сферы и пространственные характеристики плазменных возмущений в широком диапазоне параметров в рамках сделанных допущений.

Система уравнений, описывающая взаимодействие сфер с плазмой, состоит из уравнений движения и непрерывности для ионов плазмы, уравнения зарядки для каждой из сфер и уравнений Максвелла в отсутствие магнитного поля. Анализ взаимодействия проводился на основе численного решения нестационарной задачи (начальные условия соответствуют появлению сфер и включению потоков) в бисферической системе координат методом конечных разностей.

Получены временные зависимости зарядов на сферах, а также временные и пространственные ха-

рактические распределения концентраций ионов и плотности пространственного заряда в зависимости от расстояния между сферами и параметров плазмы. Показано следующее.

Во всем диапазоне рассматриваемых параметров существует устойчивое стационарное состояние. При слабой рекомбинации ( $\tau > \tau_\sigma$ ) время установления стационарного состояния  $t$  (при начальных условиях, соответствующих незаряженным сферам и невозмущенной плазме) определяется комбинацией характерного рекомбинационного времени  $\tau = (\alpha N_0)^{-1}$  ( $\alpha$  – коэффициент рекомбинации,  $N_0$  – невозмущенная концентрация плазмы) и максвелловского времени  $\tau_\sigma = (4\pi\sigma_+ 4\pi\sigma_-)^{-1/2}$  ( $\sigma_+$  и  $\sigma_-$  – проводимости положительных и отрицательных ионов):  $t \sim (\tau\tau_\sigma)^{1/2}$ . При сильной рекомбинации  $\tau \ll \tau_\sigma$  время установления не зависит от  $\tau$  и полностью определяется большим временным масштабом системы  $\tau_\sigma$ .

В случае уединенной сферы стационарное абсолютное значение заряда на сфере  $Q_d$  увеличивается по линейному закону с ростом напряженности электрического поля и уменьшается с ростом интенсивности рекомбинационных процессов. Зависимость стационарного заряда от радиуса сферы близка к квадратичной. Наличие диффузии приводит к увеличению абсолютного значения заряда, при сильной диффузии ( $K_D = E_0 / (4\pi N_0 T)^{1/2} \sim 1-2$ ) при фиксированной напря-

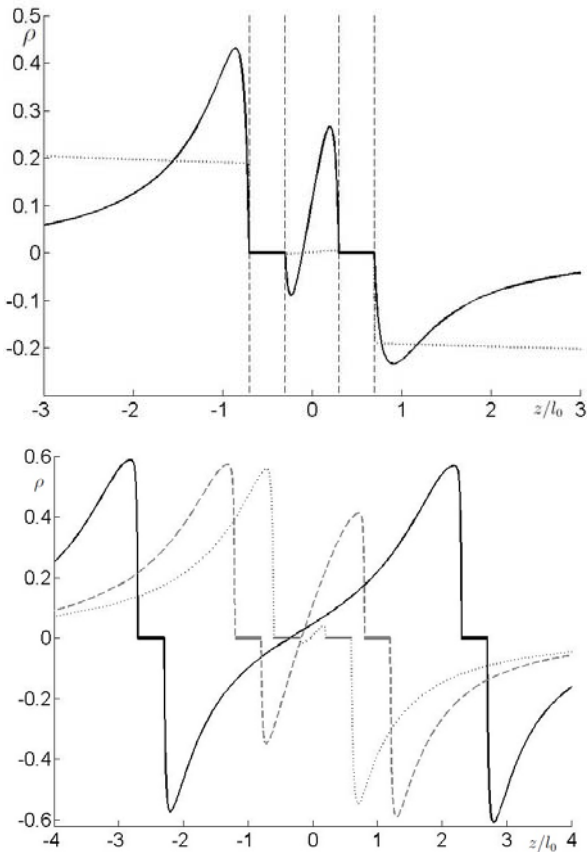


Рис. 1. Распределение плотности пространственного заряда вдоль продольной оси (внешнее электрическое поле направлено слева направо). На панели слева  $L_p/l_0 = 5$ ,  $l_0/L_+ = 0.02$ ,  $l_0/L_- = 0.01$ ,  $K_D \gg 1$  (сплошная линия) и  $K_D = 5$  (пунктирная линия). На панели справа  $l_0/L_+ = 0.02$ ,  $l_0/L_- = 0.01$ ,  $K_D = 2$ ,  $L_p/l_0 = 5$  (сплошная линия), 2 (штриховая линия) и 0.8 (пунктирная линия).

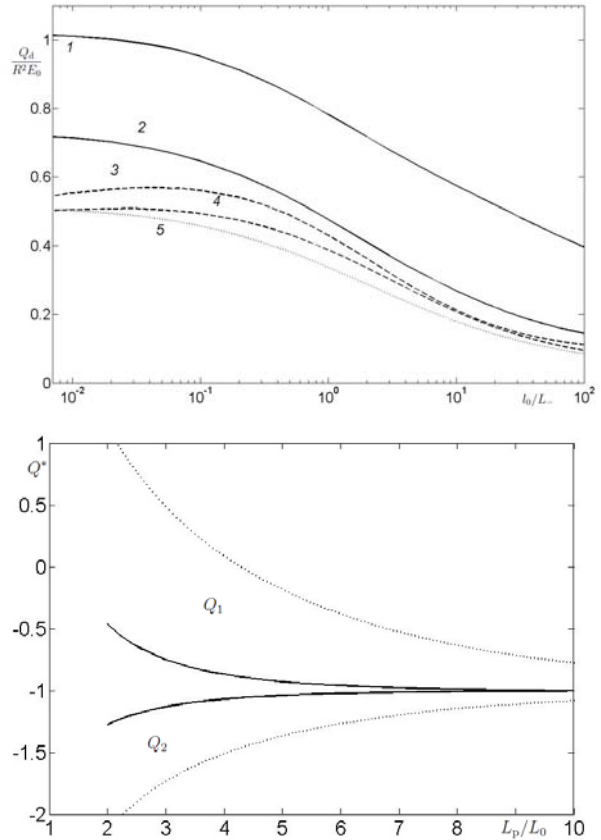


Рис. 2. Панель слева: Зависимость нормированного стационарного абсолютного значения заряда  $Q_d/(R^2 E_0)$  от параметра  $l_0/L_-$  при  $\mu_-/\mu_+ = 2$ . Кривая 1 соответствует параметрам  $K_D = 2$ ,  $R/l_0 = 0.5$ , кривая 2 –  $K_D = 5$ ,  $R/l_0 = 0.5$ , кривая 3 –  $K_D \gg 100$ ,  $R/l_0 = 0.5$ , кривая 4 –  $K_D \gg 100$ ,  $R/l_0 = 0.1$ , кривая 5 – приближенному решению [Грач, 2009]. Панель справа: Зависимость стационарных зарядов  $Q_1$  и  $Q_2$ , нормированных на заряд уединенной сферы  $Q_d$  при тех же значениях параметров от расстояния между сферами  $L_p$ . Сплошные линии соответствуют  $K_D = 5$ , пунктирные –  $K_D \gg 100$ ,  $l_0/L_+ = 0.02$ ,  $l_0/L_- = 0.01$ .

женности электрического поля зависимость  $Q_d/(R^2 E_0)$  от параметра  $K_D$  близка к  $(K_D)^{-d}$ , где показатель  $d \approx 1-1.3$ .

В случае двух сфер далеко разнесенные сферы приобретают одинаковые заряды (при соотношении подвижностей ионов  $\mu_-/\mu_+ > 1$  заряды отрицательные, при  $\mu_-/\mu_+ < 1$  – положительные). При сближении сфер при любом соотношении подвижностей заряд на сфере слева (сфера 1) повышается, на сфере справа (сфера 2) – уменьшается (электрическое поле направлено слева направо). При достаточно малом расстоянии между ними сферы также могут приобретать заряды противоположного знака; величина этого расстояния определяется параметрами плазмы.

В окружающей плазме слева от сферы 1 образуется положительно заряженная область, справа от сферы 2 – отрицательная. Плотность заряда в области между сферами меняет знак; абсолютные значения минимума и максимума плотности заряда в этой области уменьшаются с уменьшением расстояния между частицами. Начиная с определенного расстояния, по порядку величины близкого к радиусу сфер, пространственный заряд в области между сферами почти отсутствует. Продольный (по от-

ношению к внешнему полю) масштаб внешних возмущенных областей практически не зависит от радиуса сферы. При отсутствии диффузии продольный масштаб определяется соотношением электродинамического и ионизационных масштабов, уменьшаясь с ростом относительной интенсивности рекомбинационных процессов  $\tau_\sigma/\sigma$  от  $(l_0 L_+ L_- / (L_+ + L_-))^{1/2}$  (при  $\tau_\sigma/\tau \ll 1$ ) до  $l_0$  (при  $\tau_\sigma/\tau > 1$ ). Здесь  $l_0 = E_0 / (4\pi e N_0)$  – электродинамический масштаб системы,  $L_{+,-} = \alpha / (4\pi e \mu_{+,-})$  – ионизационные масштабы. Поперечный масштаб возмущений вблизи сферы определяется в первую очередь радиусом сферы и составляет  $(1.5-5)R$ . Наличие диффузии приводит к уменьшению продольного и незначительному увеличению поперечного масштаба возмущенной области в плазме. Продольные и поперечные распределения плотности пространственного заряда при наличии диффузии имеют более гладкую форму.

Примеры стационарных распределений плотности пространственного заряда в плазме вдоль оси системы приведены на рис. 1. Примеры зависимостей стационарного значения зарядов на сферах от параметров плазмы и взаимного расположения сфер приведены на рис. 2.

В предельном случае уединенной сферы, отсутствия диффузии ( $K_D > 100$ ) и сильного внешнего поля ( $R/l_0 \ll 1$ ) свойства стационарного состояния в целом совпадают с полученными ранее при приближенном решении [Грач, 2009].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Грач В.С., Семенов В.Е., Трахтенгерц В.Ю. Возмущение столкновительной плазмы сторонними телами в постоянном внешнем электрическом поле // Физика плазмы. 2009. Т. 35, № 1. С. 36–47.

Филиппов А.В., Загородний А.Г., Паль А.Ф. Кинетическое описание экранирования заряда макрочастиц в неравновесной плазме // Письма в ЖЭТФ. 2007. Т. 76, № 12. С. 873–878.

Комплексная и пылевая плазма. Из лаборатории в космос. Под редакцией В.Е. Фортова, Г.Е. Морфилла. М.: Физматлит, 2012. 444 с.

Babaeva N.Y., Lee J.K. Dust-Grain Charging in Developing Air Plasma // IEEE Transactions on Plasma Science. 2004. V. 32. P. 823–828.

Sorokin A.E. To the charging of sphere in EHD gas flow // Problems of Atomic Science and Technology. Series: Plasma Physics. 2007. V. 13, N 1. P. 58–60.

*Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия*