

---

---

## ЕЛЕКТРОФІЗИКА

---

---

УДК 533.9

*Драган Г. С., Колесников К. В.*

*НИИ физики Одесского национального университета имени И. И. Мечникова*

*E-mail: dragan@onu.edu.ua*

### **Ионизационное равновесие в сильно неидеальной дымовой плазме**

*Рассмотрено ионизационное равновесие в гетерогенной сильно неидеальной дымовой плазме при наличии конденсированных частиц и легкоионизируемой добавки атомов щелочных металлов в газовой фазе. Для определения зарядов частиц использовалось нелинейное уравнение Пуассона-Больцмана, а для ионизации атомов газовой фазы уравнение Саха с учетом эффекта смещения ионизационного равновесия. Получены зависимости концентрации электронов и зарядов частиц, а также поверхность раздела областей положительных и отрицательных зарядов частиц, от концентрации атомов цезия и концентрации частиц оксида алюминия.*

**Ключевые слова:** *гетерогенная дымовая плазма, неидеальные взаимодействия, ионизационное равновесие.*

**Введение.** Низкотемпературная плазма, которая образуется в продуктах сгорания металлизированных композиций с добавками атомов щелочных металлов в газовой фазе и получила название «дымовой плазмы» [1], характеризуется достаточно высокими зарядами на поверхности частиц [2] и поэтому взаимодействие их между собой и свободными электронами является сугубо неидеальным. Это значит, что энергия электростатического взаимодействия значительно превышает энергию хаотического теплового движения. В этом случае при использовании распределения Пуассона-Больцмана линеаризация экспоненциальных зависимостей представляется некорректной.

Для решения задачи ионизационного равновесия в такой плазме часто применяются различные физические модели, ограничивающие величину заряда на поверхности частицы [3, 4]. Однако, как показано в работе [5], неидеальность взаимодействий сопровождается смещением ионизационного равновесия в газовой фазе, что выражается во введении понятия эффективного потенциала ионизации атомов, значение которого отличается на величину работы по созданию пространственного заряда в газовой фазе. При рассмотрении ионизационного равновесия обычно эти эффекты не учитываются, что не позволяет корректно определить плазменные характеристики.

В настоящей работе предлагается использовать эффект смещения ионизационного равновесия в газовой фазе и нелинейное уравнение Пуассона-Больцмана для определения характеристик ионизационного равновесия в неидеальной гетерогенной плазме.

**Постановка задачи.** Рассмотрим неидеальную дымовую плазму, которая содержит частицы оксидов алюминия и легкоионизируемую примесь атомов цезия в газовой фазе. Концентрация свободных электронов в такой плазме [2] достигает значения  $10^{20} \text{ м}^{-3}$  при температуре порядка 2500 К, а частицы оксида алюминия могут приобретать большие отрицательные заряды (до  $10^4$  элементарных зарядов электрона), при которых возникает неидеальное взаимодействие заряженных частиц.

Межфазное взаимодействие в плазме с конденсированной дисперсной фазой приводит к тому, что подсистема конденсированных частиц не может быть описана как независимая термодинамическая система. Поэтому равновесную ионизацию в плазме с конденсированной фазой следует описать единой, зависящей от параметров газовой и конденсированной фаз, константой равновесия.

Воспользуемся выражением для ионизации атомов газовой фазы с учетом смещения ионизационного равновесия вследствие появления избыточного заряда в гетерогенной плазме, предложенная в работе [5]:

$$\frac{n_e n_i}{n_a} = \frac{2g_i}{g_a} \left( \frac{2\pi m_e k_B T}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} \exp\left( -\frac{I - \psi}{k_B T} \right), \quad (1)$$

где  $I$  – потенциал ионизации изолированного атома,  $\psi = \frac{k_B T}{2e} \ln \frac{n_i}{n_e}$  – параметр неравновесности,  $g_i$ ,  $g_a$  – статистический вес иона и атома,  $k_B$ ,  $h$  – постоянные Больцмана и Планка,  $m_e$  – масса электрона,  $T$  – равновесная температура,  $n_e$ ,  $n_i$ ,  $n_a$  – концентрации электронов, ионов и нейтральных атомов соответственно. Отметим, что параметр неравновесности характеризует изменение величины потенциала ионизации изолированного атома и, следовательно, смещение ионизационного равновесия в газовой фазе в результате наличия объемного заряда и возмущения плазмы за счет воздействия заряда частицы.

**Определение заряда частицы.** Распределение самосогласованного потенциала вблизи заряженной частицы  $\phi(r)$  описывается уравнением Пуассона-Больцмана:

$$\nabla^2 \phi(r) = \frac{2e}{\epsilon_0} \sqrt{n_e n_i} \sinh \frac{e\phi(r)}{k_B T}. \quad (2)$$

В предыдущих работах [6-11] решения уравнения Пуассона-Больцмана базировались на предположении  $\frac{e\phi}{k_B T} \ll 1$ , справедливого для малых зарядов частиц в идеальной плазме. Такое решение, в частности, дает хорошо известный потенциал Дебая-Хюккеля. В рассматриваемой дымовой плазме конденсированные частицы приобретают большие заряды [2] и потому отношение  $\frac{e\phi}{k_B T}$  становится много больше единицы и линеаризовать экспоненциальную часть уравнения Пуассона-Больцмана в этом случае не представляется возможным.

Из уравнения (2), можно получить выражение для заряда частицы в виде трансцендентного уравнения относительно зарядового числа  $Z$  :

$$Z = \frac{2\sqrt{n_e n_i}}{\varepsilon_0} \int_{r_p}^{r_w} r^2 \sinh \frac{e\phi(r)}{k_B T} dr, \quad (3)$$

где  $e$  – заряд электрона,  $r_p$  – радиус частицы,  $r_w$  – радиус ячейки Вигнера-Зейтца,  $n_p$  – концентрация частиц.

Воспользуемся в первом приближении кулоновским распределением потенциала  $\phi(r) = \frac{eZ}{r}$ , тогда интегральная часть уравнения (2) решается численным методом и имеет вид:

$$\int r^2 \sinh \frac{e\phi(r)}{k_B T} dr = \frac{1}{6} \left[ a^3 E_i \left( -\frac{a}{r} \right) + r \exp \left( -\frac{a}{r} \right) (2r^2 - ar + a^2) \right],$$

где  $E_i$ - интегральная показательная функция  $E_i \left( -\frac{a}{r} \right) = c + \ln \left( \frac{a}{r} \right) - \frac{a}{r}$ ,  $c$  – постоянная Эйлера,  $a = \frac{e^2 Z}{k_B T}$ .

**Численное решение системы уравнений.** Для экспериментальных исследований представляет интерес определение концентрации электронов при различных значениях концентрации частиц, атомов примеси и заряда на поверхности частицы. Составим систему уравнений из уравнения сохранения заряда и массы:

$$n_i = n_e - Zn_p, \quad (4)$$

$$n_a = n_A - n_i, \quad (5)$$

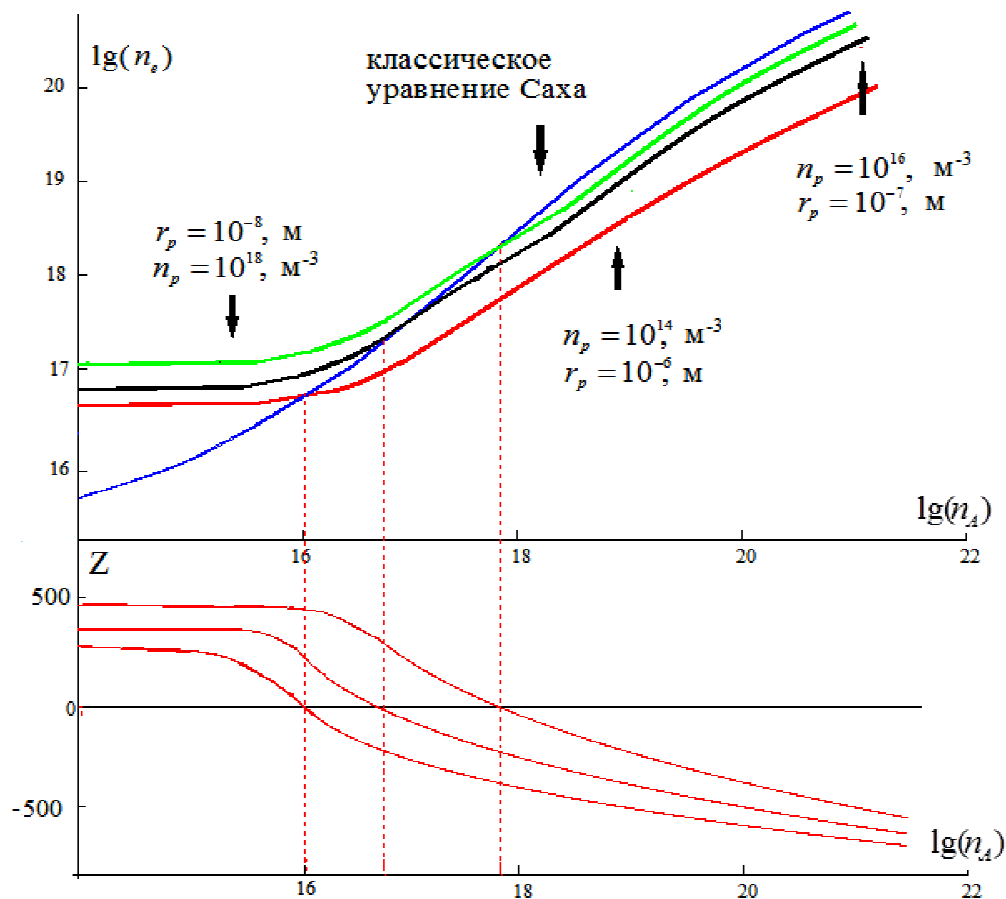
уравнения Саха (1) с учетом параметра неидеальности  $\psi$  и уравнения (3), определяющего заряд частицы. Здесь  $n_A$  - концентрация исходных атомов цезия в газовой фазе. После математических преобразований получим уравнение третьей степени относительно  $Z$  :

$$Z^3 + \frac{A^2 - 3n_e^2}{n_p n_e} Z^2 + \frac{3n_e^3 + 2A^2 n_e + 2A^2 n_A}{n_p^2 n_e} Z + \frac{A^2 (n_e + n_A)^2 - n_e^4}{n_p^3 n_e} = 0, \quad (6)$$

где  $A = \left( \frac{2\pi m_e k_B T}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} \exp \left( -\frac{I - \psi}{k_B T} \right)$ .

Численное решение данной системы уравнений позволяет получить зависимости значений концентрации электронов и зарядов частиц от исходной концентрации атомов цезия и концентрации частиц в сильно неидеальной плазме. Ниже на рис. 1 приведены графики зависимостей концентрации электронов и зарядов частиц от параметров плазмы.

Как следует из рис. 1, зависимости концентрации электронов в дымовой плазме при различных параметрах конденсированной фазы пересекают кривую

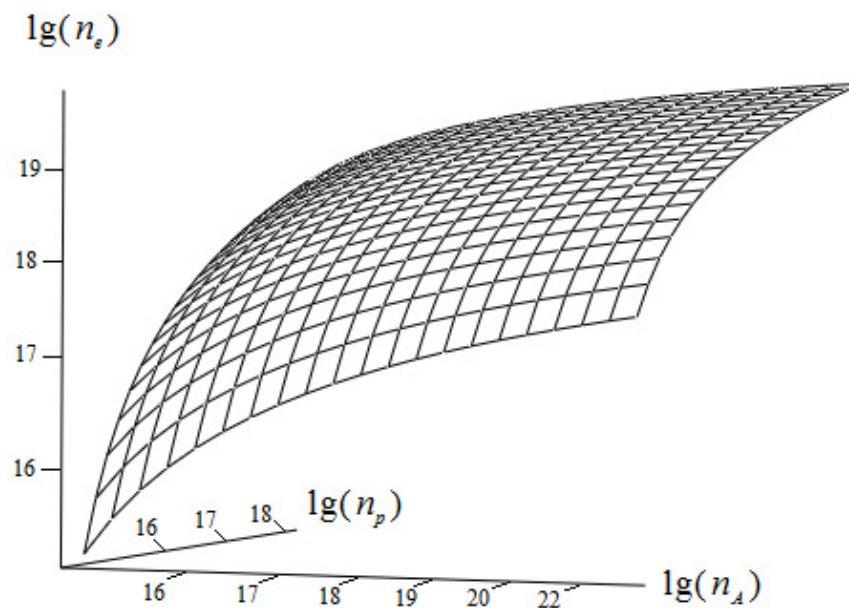


**Рис. 1.** Графики зависимостей концентрации электронов и зарядов частиц от исходных параметров плазмы

Саха в разных точках, что соответствует равенству концентраций электронов и ионов. Естественно, что в этом случае заряды конденсированных частиц соответствуют равенству нулю. Это можно также видеть, если сопоставить результаты верхнего графика с зависимостями зарядов частиц от концентрации атомов цезия в газовой фазе, представленные на нижнем графике. Видно, что заряды частиц имеют положительные значения, которые соответствуют термоэмиссионному механизму, а затем, пересекают линию нулевого заряда и с увеличением концентрации цезия приобретают отрицательные заряды на поверхности. При этом отрицательные заряды частиц соответствуют некоторому снижению концентрации свободных электронов и кривая дымовой плазмы ложится ниже кривой Саха.

На рис. 2 показана поверхность раздела областей положительных и отрицательных значений зарядов частиц в координатах концентрации частиц и концентрации атомов цезия.

Как видно из рис. 2, с понижением значения  $n_A$  область отрицательных зарядов приближается к нулевому значению. Аналогична зависимость границы нулевых значений зарядов частиц от их концентрации. Если электроны образуются в газовой фазе преимущественно за счет ионизации атомов, то отрицательные заряды частиц возникают при более высоких значениях концентрации атомов цезия.



**Рис 2.** Поверхность раздела области положительных и отрицательных зарядов частиц в пространстве концентрации электронов, атомов цезия и частиц

**Выводы.** Рассмотрены некоторые решения нелинейных уравнений, описывающие неидеальность процессов, протекающих в дымовой плазме. Показано что, механизмы приобретения заряда поверхностью частицы зависят не только от поверхностных свойств частиц, но и от таких характеристик газовой фазы, как ее зарядовое состояние, степень ионизации и концентрации легкоионизирующейся присадки.

Наряду с тем, следует отметить, что настоящая модель предполагает преимущественное образование свободных электронов за счет ионизации атомов цезия, поэтому больше внимания уделено области отрицательных значений зарядов частиц. Для более детального изучения области положительных зарядов частиц следует более детально описать термоэлектронную эмиссию с поверхности частиц.

### Литература:

1. *Dragan G.S.* Dusty and smoky plasmas. Some properties and applications. // Ukr. J. Phys. – 2005. – V. 50., No. 2. – P. 130-134.
2. *Vishnyakov V.I., Dragan G.S.* Ordered spatial structures of dust grains in the thermal plasma. // Phys. Rev. – 2006. – E 73. – No. 2. 026403. - P. 1.-7.
3. *Yakubov I. T., Khrapak A. G.* Thermophysical and electrophysical properties of low temperature plasma with condensed disperse phase // Sov. Tech. Rev. B: Therm. Phys. 2. – 1989. – P .269–337.
4. *Momot A. I.* Effective charge of a macroparticle in a non-isothermal plasma within the Poisson-Boltzmann model // Contributions to Plasma Physics. – 2018. – Vol.58. – P. 233-238.
5. *Драган Г. С.* Межфазные термодинамические взаимодействия в плазме продуктов сгорания. // Вістник Одеськ. держ. ун-ту. Фіз.-мат. Науки. – 2003. – Т.8. – №.2. – С. 163-185.

6. *Dautov G. et al* Calculation of distribution of potential and electron concentration in Influence of metal macroparticles to the electron density in a dusty plasma the dust-electron thermal plasma with the axial geometry particles // J. Phys.: Conf. Ser. – 2014. – Vol. 567. – P. 012006.
7. *Fayrushin I. et al* Influence of metal macroparticles to the electron density in a dusty plasma // J. Phys.: Conf. Ser.. – 2014. – Vol. 567. – P. 012009.
8. *Dautov G., Dautov I., Fayrushin I. and Kashapov N.* Distribution of electric field near the surface of the aluminum oxide particle in the dustelectron thermal plasma// J. Phys.: Conf. Series–2013–V.479– P.12-14.
9. *Ваулина О. С., Петров О. Ф., Фортвов В. Е., Храпак А. Г., Храпак С. А.* Пылевая плазма: эксперимент и теория, Физматлит, Москва (2009).
10. *Филиппов А.В., Загородний А.Г., Момот А.И., Паль А.Ф., Старостин А.Н.* Экранирование движущегося заряда в неравновесной плазме // ЖЭТФ – 2009. – Т.135, №3.– С.567-586.
11. *Zagorodny A.G., Filippov A.V., Pal' A.F., Starostin A.N., Momot A.I.* Effective grain potential in a plasma with external sources of ionization // Problems of Atomic Science and Technology, Series: Plasma Physics (12) – 2006. – №6. – P. 99-103.

***Драган Г. С., Колесніков К. В.***

### **Іонізаційна рівновага в сильно неідеальній димовій плазмі**

#### АНОТАЦІЯ

*Досліджено іонізаційну рівновагу в гетерогенній сильно неідеальній димовій плазмі при наявності конденсованих частинок і легкоіонізуємої добавки атомів цезію в газовій фазі. Для визначення зарядів частинок використовується нелінійне рівняння Пуассона-Больцмана, а для іонізації атомів газової фази рівняння Саха з урахуванням ефекту зміщення іонізаційної рівноваги. Отримано залежності концентрації електронів і зарядів частинок, а також поверхню розділу областей позитивних і негативних зарядів частинок, від концентрації атомів цезію і концентрації частинок оксиду алюмінію.*

**Ключові слова:** *Гетерогенна димова плазма, неідеальні взаємодії, іонізаційна рівновага.*

***Dragan G.S., Kolesnikov K.V.***

### **Ionization equilibrium in a highly imperfect smoke plasma**

#### SUMMARY

*The ionization equilibrium in a heterogeneous strongly nonideal smoky plasmas containing condensed particles and an easily ionized addition of cesium atoms in the gas phase is considered. To determine the charges of particles, the nonlinear Poisson-Boltzmann equation was used, and for the ionization of atoms of the gas phase, the Saha equation taking into account the effect of the displacement of the ionization equilibrium. The dependences of the concentration of electrons and particle charges, as well as the interface between the regions of positive and negative charges of particles, on the concentration of cesium atoms and the concentration of aluminum oxide particles are obtained.*

**Key words:** *Heterogeneous smoke plasma, nonideal interactions, ionization equilibrium.*