

УДК 536.6: 536.461:533.9

В. И. Маренков

Одесский государственный университет им. И. И. Мечникова

ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ ЭНЕРГИИ ГЕЛЬМГОЛЬЦА ГЕТЕРОГЕННОЙ ПЛАЗМЫ С МАКРОЧАСТИЦАМИ

Запропоновано новий метод розрахунку кореляційної енергії плазми з конденсованими частинками (КЧ) в газовій фазі, заснований на статистичній моделі квазінейтральних чарунков для гетерогенних плазмових систем. Отримано аналітичні формули для електростатичних внесків КЧ, які явно залежать від електронних та діелектричних характеристик речовини макрочастинок, у функціонал енергії Гельмгольца плазмозолів. Обговорено можливі застосування результатів у впровадженнях.

Предложен новый метод расчета корреляционной энергии плазмы с конденсированными частицами (КЧ) в газовой фазе, основанный на статистической модели квазинейтральных ячеек для гетерогенных плазменных систем. Получены аналитические формулы для электростатических вкладов КЧ, которые явно зависят от электронных и диэлектрических характеристик вещества макрочастиц, в функционал свободной энергии Гельмгольца плазмозолей. Обсуждены возможные применения результатов в приложениях.

A new method of calculation of the correlation energy of plasma with condensed particles (CP) in gaseous phase based on statistical model quasineutrality cell for heterogeneous plasma system is suggested. Analytical formulae for a electrostatic contribution of CP which are dependent on electronic and dielectric properties of the macroparticle substance are received. Possible application of results are obtained.

Высокотемпературные гетерогенные плазменные среды, которые используются современными технологиями, характеризуются существенной ионизацией компонентов, и, как следствие, заметными вкладами кулоновского взаимодействия в термодинамические потенциалы [1]. В частности, в плазме с конденсированной дисперсной фазой (ПКДФ) это приводит к изменению структуры зарядовых микро неоднородностей в объеме и возможности реализации таких специфических эффектов как "перезарядка" дисперсных частиц – изменению знака среднего заряда макрочастицы определенного сорта при изменении ее геометрического размера в ансамбле [2]. Масштаб зарядовых микро неоднородностей в ПКДФ непосредственно связан с кулоновской частью свободной энергии плазмы – ее корреляционной энергией. Для слабонеидеальной ПКДФ энергия кулоновского взаимодействия газовых и макроскопических частиц в больсмановской плазме может быть вычислена аналитически [3]. Для неидеальной ПКДФ эта задача аналитического решения не имеет, и может быть решена лишь численно в рамках заданной физической модели термодинамических процессов в гетерогенной системе. Предлагаемая модель описания ионизационного равновесия неидеальной ПКДФ основана на развитых в [4–5] представлениях о зарядовом равновесии индивидуальных макрочастиц конденсированной дисперсной фазы (КДФ). Частица КДФ, находящаяся в равновесии с плазмой, с точностью до флуктуаций сохраняет свой электрический заряд, и таким образом формирует свою электрон-ионную атмосферу, чтобы в каждый момент времени дешмановский поток электронов эмиссии с ее поверхности был уравновешен потоком электронов, поступающим извне за счет взаимодействия макрочастицы с окружающей плазмой. Плотность электрон-ионной атмосферы конденсированной частицы (КЧ) и распределение самосогласованного потенциала в ее окрестности связаны уравнением Пуассона-Больцмана. Вследствие принципа ослабления корреляций, на больших расстояниях от КЧ самосогласованный электростатический потенциал мал по модулю и асимптотически приближается к нулю на бесконечности. Это значит, что исходя из непрерывности самосогласованного потенциала, определенного в лагранжевых координатах выделенного макрочастицы, в неограниченной плазменной системе всегда можно указать такое расстояние от КЧ, начиная с которого абсолютное значение потенциала становится меньшим сколь угодно малого, заданного наперед положительного числа ϵ . Предлагаемый метод расчета корреляционной энергии взаимодействия зарядов плазмы состоит в следующем:

1. Приближенное решение задачи Коши для самосогласованного потенциала $\Phi(\vec{r})$ в плазме заменяется аналитическим дебаевским решением в области "II" – слабого экранирования, и приближенным численным решением в области "I" – сильной экранировки КЧ (см. рис. 1). Точка сопряжения r_s выбирается из условия достижения необходимой точности расчета, и как показывает численный эксперимент, локализуется для относительной точности $\epsilon_{ps} < 10^{-6}$ в области радиусов (расстояний) $r_1 \in [r_p, 2 \cdot r_p]$;

2. Решение уравнения Пуассона-Больцмана, найденное указанным способом и подставленное в формулу для потенциальной энергии взаимодействия зарядов известную из электростатики [6], дает вклад отдельной макрочастицы в корреляционную энергию неидеальной ПКДФ.

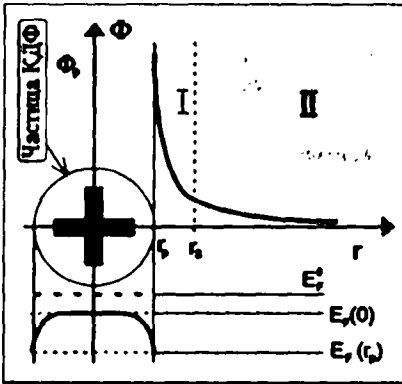


Рис. 1. Распределение самосогласованного потенциала Φ вне и внутри выделенной макро-частицы, контактирующей с неидеальной ПКДФ. I и II – области нелинейной и линейной экранировки КЧ; E_F^0 – энергия Ферми электронов вещества макрочастицы; $E_F(0)$ и $E_F(r_p)$ – значения фермиевской энергии в центре и в поверхностном контактном слое; КЧ – плазме.

$$W = \frac{1}{2} \int_V \rho(\vec{r}) \Phi(\vec{r}) d\vec{r} = \frac{1}{8\pi} \left\{ \int_V |\vec{\nabla} \Phi(\vec{r})|^2 d\vec{r} - \int_S \Phi(\vec{r}) \frac{\partial \Phi(\vec{r})}{\partial n} d\vec{s} \right\}. \quad (1)$$

Поверхностный интеграл в (1) на бесконечно удаленной поверхности обращается в ноль. Объемный интеграл представляется в виде суммы трех слагаемых F_p, F_I, F_{II} – соответственно составляющих электростатической энергии: собственно КЧ, области I и области II (см. рис. 1). Для модели неидеального плазмозоля идентичных сферических частиц вклады F_p, F_{II} и F_I отдельной КЧ в функционал энергии Гельмгольца будут

$$F_p = - \frac{z^2 e^2 c_F}{4\epsilon_p} \frac{\text{th}(c_F r_p) \{ 1 + (c_F r_p) \text{th}(c_F r_p) \} - (c_F r_p)}{\{ (c_F r_p) - \text{th}(c_F r_p) \}^2}$$

$$F_{II} = - \frac{\epsilon_{ps}^2}{4} \left(\frac{kT}{e} \right)^2 \frac{\tilde{r}_1^2}{c} \sqrt{1+z}$$

$$F_I = - \frac{1}{2c} \left(\frac{kT}{e} \right)^2 \cdot \left\{ \tilde{r}^2 [\Phi(\tilde{r}) \Phi'(\tilde{r})] \Big|_{\tilde{r}_p}^{\tilde{r}_s} - \int_{\tilde{r}_p}^{\tilde{r}_s} [\Phi(\tilde{r})]^2 \tilde{r}^2 d\tilde{r} \right\}.$$

Здесь: z, r_p – зарядовое число и размер КЧ, c_F, ϵ_p – инвентированный радиус Ферми электронов проводимости и диэлектрическая проницаемость вещества КЧ; ϵ_{ps} – точность расчета; T – температура плазмозоля; $\tilde{r} = cr$ – безразмерный радиус; $c^2 = 4\pi e^2 < n_e > / (kT)$ – квадрат обратной Дебаевской длины для электронов газовой фазы;

3. По формулам (2) определяется корреляционный вклад дисперсной частицы в функционал свободной энергии ПКДФ, минимизируя который окончательно определим степень ионизации плазменной среды, т. е. $\langle n_e \rangle$ – среднюю концентрацию электронов.

На рис. 2 приведены рассчитанные на основе изложенной методики зависимости собственной электростатической энергии макрочастиц, образующих в совокупности с эмитированными ними электронами и буферным газом высокотемпературную гетерогенную плазменную систему – плазмозоль [6], электрофизические свойства которого непосредственно зависят от электронных и диэлектрических характеристик вещества частиц и определяющих параметров ансамбля КДФ.

Из графиков видно, что корреляционная энергия индивидуальных макрозарядов в области малых размеров КЧ ($r_p < 10^{-5}$ см) существенно зависит от электронных и диэлектрических свойств вещества частиц КДФ. Физически это связано с наличием локального максвелловского электрического поля в контактном слое КЧ, относительный вклад

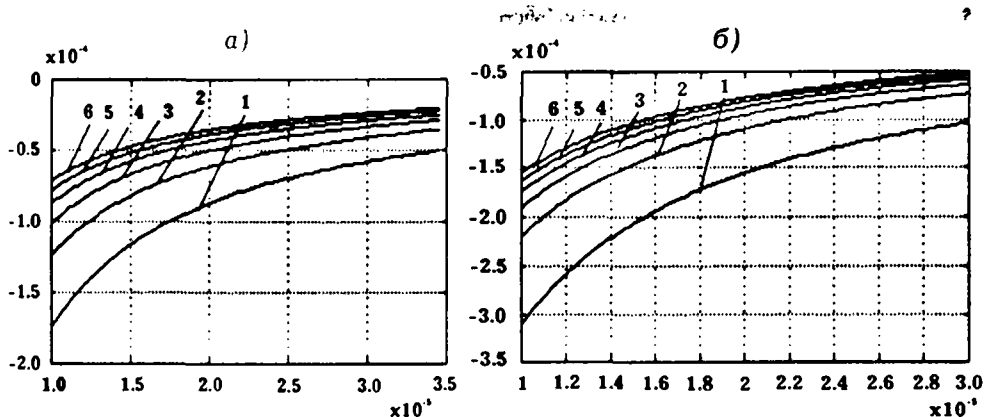


Рис. 2. Зависимости собственной безразмерной электростатической энергии $\tilde{F}_p = F_p / [z^2 e^2 / (2r_p)]$ макрочастиц конденсированной дисперсной фазы от их размера r_p для различных определяющих параметров ПКДФ: а) кривые 1+5 получены для $\epsilon_p = 3$ и соответствуют $E_F^0 = 0.5, 2, 3.5, 5, 6.5, 8$ эВ; б) зависимости построены для энергии Ферми электронов вещества макрочастиц $E_F^0 = 5$ эВ и $\epsilon_p = 3, 6, 9, 12, 15, 18$ соответственно.

которого в электрофизические характеристики ПКДФ с ростом размеров макрочастиц уменьшается (графики асимптотически приближаются к значениям \tilde{F}_p , которые определяются плотностью электростатической энергии в контакте: ПКДФ – плоская стенка из вещества КЧ при температуре T и заданном уровне электрохимического потенциала системы).

Явные выражения для корреляционных электростатических вкладов КЧ (формулы (2)) в функционал свободной энергии Гельмгольца плотной неидеальной плазмы с КДФ получены в работе впервые, что открывает новые возможности для прогнозирования и расчета электрофизических характеристик высокотемпературных гетерогенных систем с ультрадисперсными сильно ионизированными частицами в газовой фазе. В системах с полидисперсным спектром размеров макрочастиц, условия минимума электростатической части функционала Гельмгольца определяют реализуемые состояния термоионизационного равновесия и, с использованием статистической модели квазинейтральных ячеек [3–5], дают возможность найти характерный масштаб кулоновских микронеодно-

родностей в гетерогенной плазме вблизи макровключений. Для ПКДФ во внешнем электрическом поле разработанный модельный подход описания термоионизации гетерогенных плазменных систем может быть положен в основу компьютерных моделей расчета структуры локальных электростатических неоднородностей, создаваемых в объеме плазмы заряженными макрочастицами.

1. **Marenkov V. I.** Electrophysical Properties of Aerosol Plasma Formed by Combustion and Explosion Products. - AAAR'96, October 14-18, 1996. - Orlando, Florida. - 1996. - 12 P G 2.
2. **Marenkov V.I., Rosanova M.A.** Effects of "recharging" in heterogeneous fulleren-containing plasma // EPS-9, Trends in physics, Standart model and beyond. - Firenze, Sept. 14-17, 1993.
3. **Маренков В. И.** Электрофизические свойства плотных высокотемпературных аэрозолей с существенной ионизацией газовой фазы и конденсированных частиц. // В кн.: "Дисперсные системы" - Одесса: ОЦНТЭИ. - 1996. С. 129-130.
4. **Marenkov V.I.** Statistical Description of Ionization State in Combustion Aerosols// Journal of Aerosol Sci., Vol.26, Sup.1, 1995. - P. S621 - S692.
5. **Маренков В. И.** Электрофизические характеристики плазмы с макрочастицами конденсированной дисперсной фазы и атомами щелочных металлов в газовой фазе // Физика аэродисперсных систем. - 1998. - Вып. 37. - С. 128-143.
6. **Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.** Электродинамика сплошных сред. - М.: Наука, 1982. - 621 с.