

УДК 537.53

С.И. Мольков, В.Н. Савин

**ВЛИЯНИЕ ПРОЦЕССОВ ЭЛЕКТРОННОЙ ЭМИССИИ
НА ЗАРЯД ПЫЛЕВЫХ ЧАСТИЦ В УПОРЯДОЧЕННЫХ
ПЛАЗМЕННО-ПЫЛЕВЫХ СТРУКТУРАХ**

S.I. Molkov, V.N. Savin

Karelian State Pedagogical Academy,
17 Pushkinskaya St., Petrozavodsk, 185680, Russia

**INFLUENCE OF ELECTRON EMISSION PROCESSES ON THE CHARGE OF
DUST PARTICLES IN ORDERED PLASMA-DUST STRUCTURES**

В статье на качественном и количественном уровнях рассмотрено влияние эмиссионных процессов и степени шероховатости поверхности на величину электрического заряда пылевых частиц.

ПЫЛЕВАЯ ЧАСТИЦА. ПЫЛЕВАЯ ПЛАЗМА. ЭМИССИЯ ЭЛЕКТРОНОВ. КОЭФФИЦИЕНТЫ ЭМИССИИ. СТЕПЕНЬ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ. ТЕРМОЭМИССИЯ.

In the article the influence of electron emission processes and roughness parameter on a dust particle electric charge are considered quantitatively and qualitatively.

DUST PARTICLE. DUSTY PLASMA. ELECTRON EMISSION. EMISSION FACTORS. DEGREE OF SURFACE ROUGHNESS. TERMOEMISSION.

Пылевая, или комплексная, плазма представляет собой ионизированный газ, содержащий заряженные частицы конденсированного вещества. Погруженные в объем плазмы, эти пылевые частицы приобретают электрический заряд за счет потока на их поверхность заряженных частиц плазмы. Заряженные микрочастицы образуют упорядоченные плазменно-пылевые структуры. Интерес к изучению таких структур обусловлен широкой распространенностью пы-

левой плазмы в природе и технике и возможностью изучения с ее помощью фундаментальных физических явлений, таких как фазовые переходы, колебания, волны и неустойчивости [1]. Важной характеристикой пылевой плазмы является заряд микрочастиц; в процессе их зарядки существенную роль играет эмиссия электронов [1]. В настоящей работе количественно рассмотрено влияние разных видов эмиссии электронов и микронеровности поверхности



пылевых частиц на зависимость их заряда от параметров невозмущенной плазмы.

Заряд пылевых частиц определяется уравнением баланса зарядов, которое с учетом процессов эмиссии вторичных и термоэлектронов имеет вид:

$$J_i = J_e - P_f \left[\bar{r} J_e \kappa_r + \bar{\delta} J_e \kappa_\delta + \gamma J_i \kappa_\gamma + Y J_{ph} \kappa_{pe} + J_{th} \kappa_W \right], \quad (1)$$

где J_i, J_e, J_{ph}, J_{th} – плотности потоков ионов, электронов, резонансных фотонов и термоэлектронов; $\bar{r}, \bar{\delta}$ – коэффициенты вторичной электронной эмиссии для упруго отраженных и истинно вторичных электронов, усредненные по функции распределения электронов по энергии (ФРЭЭ); γ – коэффициент ионно-электронной потенциальной эмиссии; Y – квантовый выход фотоэффекта; P_f – вероятность выхода электрона с шероховатой поверхности пылевой частицы без повторного столкновения (для гладкой поверхности $P_f = 1$); κ – фактор, определенный ниже.

Плотность потока термоэлектронов определяется температурой пылевой частицы, и для ее определения уравнение баланса заряда должно решаться совместно с уравнением баланса энергии:

$$J_a \alpha_a 2(T_W - T_a) + J_{th} P_f \kappa_W 2T_W + a_0 \sigma_0 T_W^4 = J_i \left[E_a + \alpha_i (\varepsilon_{iW} - 2T_W) - P_f \gamma \varepsilon_\gamma \kappa_\gamma \right] + J_e \left[2T_e - P_f (\bar{r} 2T_e \kappa_r + \bar{\delta} \varepsilon_\delta \kappa_\delta) \right] + J_{ph} (E_{ex} - P_f Y \varepsilon_{pe} \kappa_{pe}), \quad (2)$$

где J_a – плотность потока атомов; α_a, α_i – коэффициенты аккомодации атомов и ионов; – постоянная Стефана – Больцмана; a_0 – интегральная поглощательная способность пылевой частицы (степень черноты); $T_a \cong T_i, T_e, T_W$ – температуры атомов (ионов), электронов и вещества пылевой частицы, выраженные в энергетических единицах; $\varepsilon_{iW}, \varepsilon_\gamma, \varepsilon_\delta, \varepsilon_{pe}$ – кинетическая энергия ионов и вторичных электронов при ионно-электронной эмиссии, истинно вторичных электронов и фотоэлектронов; E_a, E_{ex} – энергии ионизации и возбуждения резонансных уровней.

Левая часть уравнения (2) включает члены, учитывающие охлаждение пылевой частицы атомами, термоэлектронами и излучением, а правая – члены, учитывающие нагрев пылевой частицы ионами, электронами, резонансными фотонами и охлаждение соответствующими вторичными электронами. В табл. 1 приведены использованные при расчетах плотности потоков частиц и энергии, переносимые на поверхность пылевой частицы или с ее поверхности.

Выражения для плотности потоков частиц J_i и J_e соответствуют приближению ограниченного орбитального движения [1]. Здесь m_a, m_e – массы атомов (ионов) плазмообразующего газа и электронов; ϕ_W, W_0 – потенциал и работа выхода для пылевой частицы; $e\Delta\phi$ – снижение работы выхода за счет эффекта Шоттки; Q_{ex}, β_i – константа скорости возбуждения резонансных уровней атомов, распадающихся спонтанно, и коэффициент ионизации; n_a, n_0 – концентрации атомов и электронов (ионов) в невозмущенной плазме. Величина Q_{ex} / β_i в зависимости от n_0 и T_e определялась по методике [2]. В расчетных формулах использованы безразмерные величины

$$\tau = T_e / T_a; \quad \tau_W = T_W / T_a; \quad \mu = m_e / m_a,$$

$$z = e\phi_W / T_e = eq / 4\pi\epsilon_0 a T_e,$$

где a – радиус пылевой частицы; q – заряд. В расчетах принималась $T_a = 300 \text{ К} = 0,026 \text{ эВ}$.

В табл. 2 представлены использованные нами для расчетов выражения для коэффициентов эмиссии и энергии вторичных электронов. Здесь r_m, ε_m и A, a, ε_n – параметры аппроксимации функциональных зависимостей коэффициентов эмиссии $r(\varepsilon, \theta)$ и $\delta(\varepsilon, \theta)$ (ε – энергия, θ – угол падения электронов на поверхность пылевой частицы); $\Gamma(x)$ – гамма-функция. Усреднение проводилось по максвелловской ФРЭЭ с температурой T_e . Рекомендуемые нами значения параметров аппроксимации, полученные по данным [3] для диэлектриков, равны 0,55; 4,0 эВ; 0,18; 0,54; 4,5 эВ, соответственно.

Для металлов, у которых разброс параметров аппроксимации больше, в табл. 3 приведены значения этих параметров для ряда веществ. Там же приведены значения степени

Таблица 1

Выражения и расчетные формулы для плотностей потоков и энергий частиц различного типа

Тип частиц	Плотность потоков частиц	Расчетная формула для J , $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$	Энергия частиц, эВ
Атомы	$J_a = n_a \sqrt{\frac{T_a}{2\pi m_a}}$	$2,69 \cdot 10^6 n_a \sqrt{\mu}$	$2T_a = 0,052$
Ионы	$J_i = n_0 \sqrt{\frac{T_a}{2\pi m_a}} \Phi$, $\Phi = \begin{cases} 1 - e\phi_W / T_a, & \phi_W < 0 \\ \exp[-e\phi_W / T_a], & \phi_W > 0 \end{cases}$ [1]	$2,69 \cdot 10^6 n_0 \sqrt{\mu} \Phi$, $\Phi = \begin{cases} 1 - z\tau, & z < 0; \\ e^{-z\tau}, & z > 0 \end{cases}$	$\varepsilon_{iW} = \begin{cases} 2T_a - e\phi_W, & = \\ 2T_a & = \\ \begin{cases} 0,026(2 - z\tau), & z < 0; \\ 0,052, & z > 0 \end{cases} \end{cases}$
Электроны	$J_e = n_0 \sqrt{\frac{T_a}{2\pi m_a}} \exp\left\{\frac{e\phi_W}{T_a}\right\}$ [1]	$2,69 \cdot 10^6 n_0 \sqrt{\tau} e^z$	$2T_e = 0,052\tau$
Фотоны	$J_{ph} = n_0 \sqrt{\frac{T_a}{2\pi m_a}} \frac{Q_{ex}}{\beta_i}$	$2,69 \cdot 10^6 n_a \sqrt{\mu} \frac{Q_{ex}}{\beta_i}$	E_{ex}
Термоэлектроны	$J_{th} = A_0 T_W^2 \exp\left\{\frac{W_0 - e\Delta\phi}{T_W}\right\}$ [1]	$6,75 \cdot 10^{25} \tau_W^2 \times$ $\times \exp\left\{-\frac{38,5(W_0 - e\Delta\phi)}{\tau_W}\right\};$ $e\Delta\phi =$ $= \begin{cases} 6,13 \cdot 10^{-3} \sqrt{\frac{ z \tau}{a[\text{МКМ}]}}; & z < 0; \\ 0, & z > 0 \end{cases}$	$2T_W = 0,052\tau_W$

черноты поверхности и работы выхода электронов W_0 . Фактор κ , входящий в уравнения (1) и (2), равен единице при отрицательном заряде пылевой частицы ($q < 0$) и равен $\exp\{-e\phi_W / T\}$ при положительном заряде. Температура принимает значения $T_e, T_\delta, T_\gamma, T_{pe}$ для процессов, приведенных в табл. 2, и T_W для термоэлектронов.

Вероятность вылета электронов P_f определяется среднеквадратичным отклонением σ радиуса частицы от среднего уровня и радиусом корреляции высот шероховатости [4]:

$$P_f = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \arctg \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\rho}{\sigma}}$$

Коэффициенты accommodation атомов и ионов при столкновениях с шероховатой поверхностью пылевых частиц равны [4]:

$$\alpha_a = \frac{\alpha_0}{\alpha_0 + P_f(1 - \alpha_0)};$$

$$\alpha_i = \frac{\alpha_0(1 + 0,5P_f)}{\alpha_0 + P_f(1 - \alpha_0)},$$

где $\alpha_0 = 2,4\mu / (1 + \mu)^2$ [7], $\mu = m_a / m_W$ — отношение массы атома (иона) к массе атома поверхности пылевой частицы.

Из сравнительного анализа членов, входящих в уравнение (1), следует, что влияние термоэмиссии необходимо учитывать, когда

$$T_W \geq (W_0 - e\Delta\phi) / (50 - \ln n_0).$$

Для иллюстрации этого утверждения на рис. 1 приведены зависимости заряда z от температуры электронов τ при разных значениях температуры поверхности частицы τ_W , рассчи-



Т а б л и ц а 2

Выражения и расчетные формулы, использованные для нахождения эмиссионных характеристик

Наименование процесса	Коэффициент эмиссии	Расчетная формула коэффициента эмиссии для диэлектриков	Энергия вторичных электронов, эВ
Эмиссия упруго отраженных электронов	$\bar{r} = 5,44 \frac{r_m \varepsilon_m^2 T_e}{(\varepsilon_m + T_e)^3}$ [4]	$\frac{1,24\tau}{(4+0,026\tau)^3}$	$2T_e$
Эмиссия истинно вторичных электронов	$\bar{\delta} = A\Gamma(1+a) \left(1+a+\frac{\varepsilon_n}{T_e}\right) T_e^a \times \exp\left\{-\frac{\varepsilon_n}{T_e}\right\}$ [4]	$3,48 \cdot 10^{-2} \left(1+\frac{112}{\tau}\right) \tau^{0,54} \times \exp\left(-\frac{137}{\tau}\right)$	$\varepsilon_{\delta} \approx 1 \text{ эВ}, T_{\delta} \approx 0,7 \text{ эВ}$
Электрон-ионная эмиссия	$\gamma = 0,016(E_a - 2W_0)$ [5]	$\approx 0,22 (\text{Ne} + \text{Al}_2\text{O}_3)$ $W_0 = 3,9 \text{ эВ} (\text{Al}_2\text{O}_3)$	$\varepsilon_{\gamma} \approx 0,5(E_a - 2W_0) \approx T_{\gamma}$
Фотоэмиссия	Y [5]	$\approx 10^{-1} (\text{He}, \text{Ne})$ $\approx 10^{-2} (\text{Ar}, \text{Kr}, \text{Xe})$	$e_{pe} \approx 0,5(E_{ex} - W_0) \approx T_{pe}$

Т а б л и ц а 3

Параметры аппроксимации коэффициентов эмиссии и соответствующие характеристики для некоторых металлов

Вещество	r_m	$\varepsilon_m, \text{эВ}$	A	a	$\varepsilon_n, \text{эВ}$	a_0 [6]	$W_0, \text{эВ}$ [5]
Cu	0,13	10	0,044	0,73	6,0	0,03	4,40
W	0,20	10	0,036	0,71	5,5	0,39	4,54
Al	0,14	4,0	0,016	0,87	5,0	0,04	4,25
Ni	0,11	2,5	0,012	0,92	4,0	0,045	4,50

таные согласно уравнению (1) для разряда в неоне с пылевыми частицами из оксида алюминия ($W_0 = 3,9$ эВ).

Начиная с некоторого порогового значения ($\tau_w = 5$), влияние термоэмиссии на величину заряда частицы становится существенным.

В случае, когда влияние термоэмиссии мало, заряд пылевой частицы зависит только от температуры электронов или при немаксвелловской ФРЭЭ – от эффективной температуры «хвоста» функции распределения.

На рис. 2 представлены зависимости заряда от температуры электронов для различных видов эмиссии с поверхности гладкой частицы, а на рис. 3 – зависимости $z(\tau)$ с учетом трех видов эмиссии при различных степенях шероховатости поверхности пылевой частицы. С ростом степени шероховатости влияние эмиссии ослабевает, и зависимость $z(\tau)$ приближается к соответствующей зависимости для гладкой частицы без учета эмиссии.

Как показывает анализ членов уравнения баланса энергии (2), нагрев пылевой частицы осуществляется, в основном, ионами, а охлаждение – излучением и атомами. Влияние остальных процессов невелико. Заряд пылевых

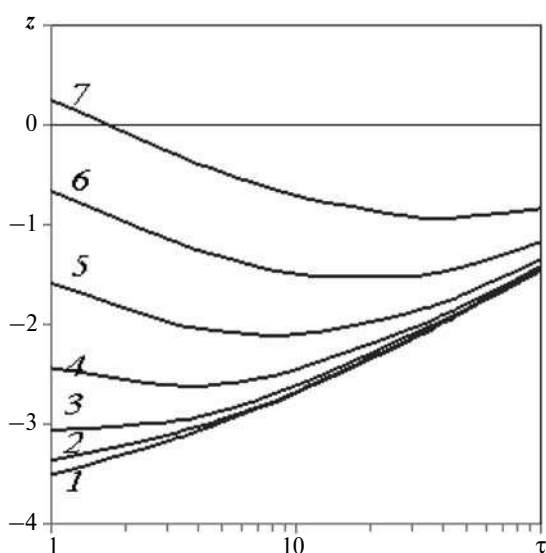


Рис. 1. Расчетные зависимости заряда гладкой пылевой частицы от температуры электронов при различных значениях нормированной температуры поверхности этой частицы τ_w : 1,0 (1); 5,0 (2); 5,2 (3); 5,4 (4); 5,6 (5); 5,8 (6); 6,0 (7)

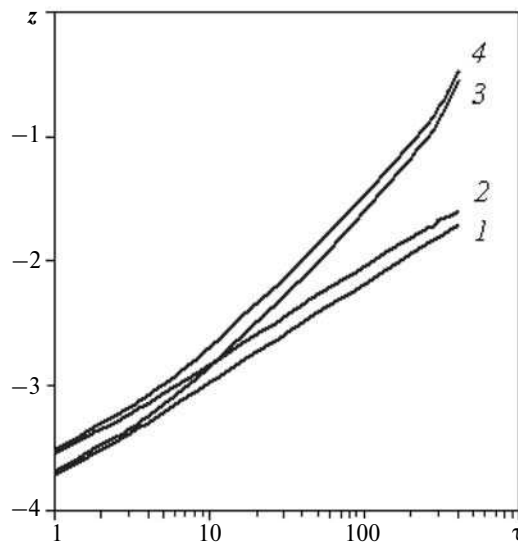


Рис. 2. Расчетные зависимости заряда гладкой пылевой частицы от температуры электронов при различных вариантах учета эмиссии: без учета (1), с учетом ион-электронной и фотоэмиссии (2), вторичной эмиссии электронов (3), всех трех видов эмиссии (4)

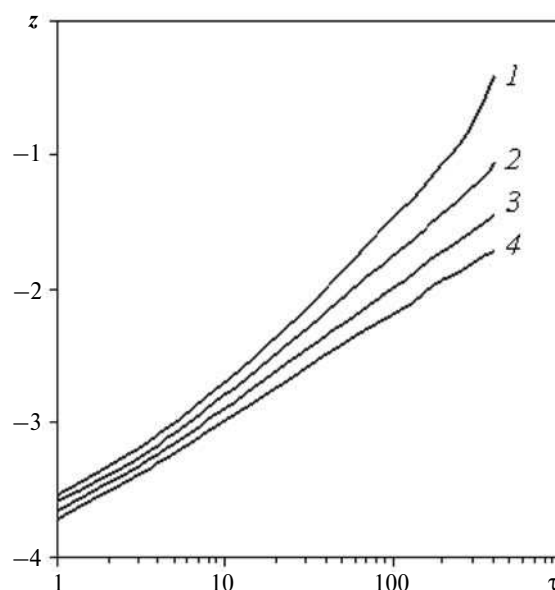


Рис. 3. Расчетные зависимости заряда пылевой частицы от температуры электронов при различных значениях степени шероховатости ее поверхности $P_s = \sigma / \rho$: 0, гладкая (1); 0,08 (2); 0,8 (3); 4 – гладкая частица без учета эмиссии

частиц при наличии термоэмиссии, помимо электронной температуры, зависит также от концентрации электронов и атомов.

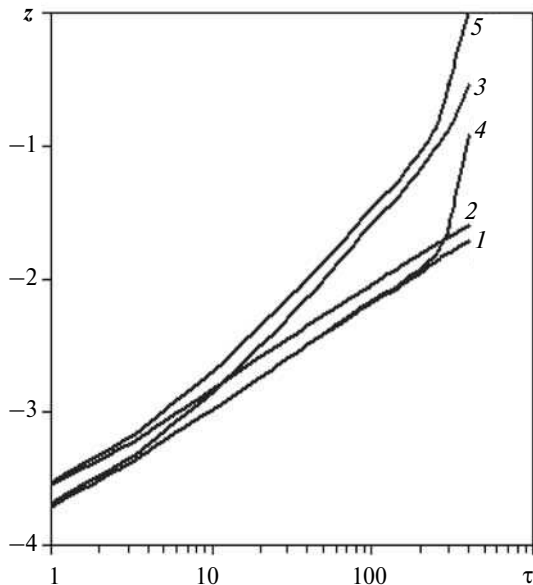


Рис. 4. Расчетные зависимости заряда гладкой пылевой частицы от температуры электронов. Кривые 1–3 соответствуют рис. 2; 4 – учтена только термоэмиссия, 5 – все виды эмиссии ($n_0 = 10^{11} \text{ см}^{-3}$, $n_a = 10^{15} \text{ см}^{-3}$, $a_0 = 0,05$)

С ростом n_0 влияние термоэмиссии растет, а с ростом n_a падает. Так, при повышенных давлениях ($p \approx 10$ торр) разогрев пылевых частиц до температур, при которых термоэмиссия

существенна, не происходит. С уменьшением давления ($p \approx 0,1$ торр) и ростом T_e , начиная с некоторого порогового значения, при малых степенях черноты ($a_0 \leq 0,1$) и достаточно высоких концентрациях заряженных частиц в невозмущенной плазме ($n_0 \approx 10^{10} - 10^{11} \text{ см}^{-3}$) влияние термоэмиссии становится существенным. На рис. 4 приведены зависимости $z(\tau)$ для различных видов эмиссии, включая термоэмиссию, полученные при совместном решении системы уравнений (1) и (2). В случаях, когда a_0 близко к единице, охлаждение излучением становится заметным и термоэмиссия затрудняется.

Таким образом, эффекты электронной эмиссии оказывают существенное влияние на величину заряда пылевой частицы, приводя в ряде случаев к существенному уменьшению заряда по абсолютной величине: в два раза и более, вплоть до смены знака заряда (см. рис. 1, $\tau_W = 6,0$). Указанное влияние делает необходимым при теоретическом описании процессов в пылевой плазме и при анализе экспериментальных данных учитывать эмиссию электронов, зависящую от параметров невозмущенной плазмы, материала микрочастиц и характера их поверхности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Фортов, В.Е.** Пылевая плазма [Текст] / В.Е. Фортов, А.Г. Храпак, С.А. Храпак [и др.] // Успехи физических наук. – 2004. – № 5. – С. 494–544.
2. **Биберман, Л.М.** Кинетика неравновесной низкотемпературной плазмы [Текст] / Л.М. Биберман, В.С. Воробьев, И.Т. Якубов. – М.: Наука, 1982. – 376 с.
3. **Бронштейн, И.М.** Вторичная электронная эмиссия [Текст] / И.М. Бронштейн, Б.С. Фрайман. – М.: Наука, 1969. – 408 с.
4. **Мольков, С.И.** Влияние процессов на стенках капилляра на параметры плазмы положительного столба разряда низкого давления [Текст] / С.И. Мольков // Уч. зап. Петрозаводского гос. ун-та. Сер. Естественные и технические науки. – 2012. – № 2 (123). – С. 88–95.
5. **Райзер, Ю.П.** Физика газового разряда [Текст] / Ю.П. Райзер; 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Наука, 1992. – 592 с.
6. **Крейт, Ф.** Основы теплопередачи [Текст] / Ф. Крейт, У. Блэк. – М.: Мир, 1983. – 512 с.
7. **Баранцев, Р.Г.** Взаимодействие газов с поверхностями [Текст] / Р.Г. Баранцев. – М.: Наука, 1975. – 228 с.

МОЛЬКОВ Сергей Иванович – доктор физико-математических наук, профессор кафедры теоретической физики и методики преподавания физики Карельской государственной педагогической академии.

185680, г. Петрозаводск, Пушкинская ул., 17
tandem@onego.ru

САВИН Василий Николаевич – аспирант кафедры теоретической физики и методики преподавания физики Карельской государственной педагогической академии.

185680, г. Петрозаводск, Пушкинская ул., 17
moped@onego.ru