

ПАРАМЕТРЫ ПОЛОЖИТЕЛЬНОГО СТОЛБА ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА С ПЫЛЕВЫМИ ЧАСТИЦАМИ

Л.М. Василяк, Д.Н. Поляков, В.В. Шумова, В.Е. Фортков

Объединенный институт высоких температур РАН

shumova@ihed.ras.ru

Введение

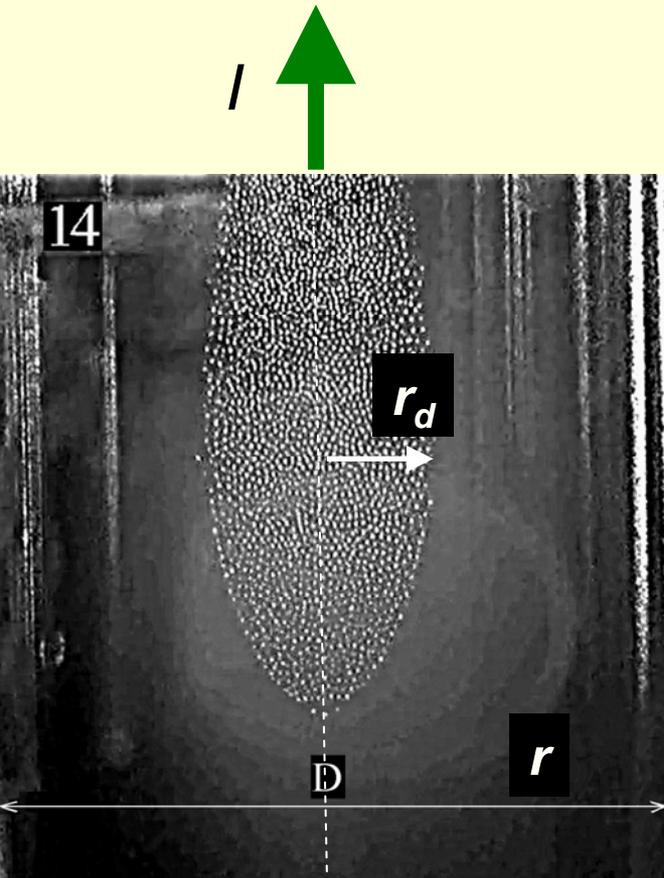
Для описания свойств плазмы тлеющего разряда, а также зарядки и поведения пылевых частиц в плазме в настоящее время существуют достаточно развитые модели на основе:

- методов молекулярной динамики (*Maigorov S A., Vladimirov S.V., Cramer N.F.; Олеванов М.А. с соавт.; Швейгерт И.В. и Питерс Ф.М*);
- методов решения кинетического уравнения Больцмана для ФРЭЭ (*Сухинин Г.И. и Федосеев А.В.*);
- гидродинамического подхода (*Losseva T.V., Popel S.I., Yu M.Y. and Ma J.X.*)

При этом обычно предполагается, что параметры фоновой плазмы известны и изменяются лишь вблизи частиц. В силу ограничений, накладываемых постановкой задачи, либо используемыми методами расчета, практически не анализируется возможность неоднородного распределения частиц в разряде.

Влияние пылевых структур на измеряемые в экспериментах параметры разряда изучено недостаточно. Расчета влияния облака пылевых частиц как отдельного объекта на параметры разряда до сих пор не проводилось.

Эксперимент:



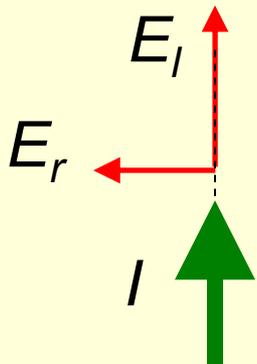
- Изучено формирование пылевых структур в газоразрядных трубках в воздухе.

- Получено, что при том же полном токе разряда I напряженность продольного поля E_I в присутствии пылевых структур выше, чем в свободном разряде.

Цели данной работы:

- Разработка модели влияния пылевых структур с заданными концентрацией частиц (n_d) и характерным размером (r_d) на нелокальные свойства плазмы тлеющего разряда (n_i , n_e , E_I , E_r).

- Расчет измеренных в экспериментах параметров положительного столба тлеющего разряда в воздухе.



Модель

Однородный положительный столб тлеющего разряда.

Для описания плазмы - диффузионное приближение ($\lambda \ll L$).

Для описания пылевой компоненты - OML ($a \ll \lambda_D \ll L$).

Диффузионное приближение:

$$\begin{aligned}J_i(r) &= \mu_i n_i E_r(r) - D_i \text{grad } n_i \\J_e(r) &= -\mu_e n_e E_r(r) - D_e \text{grad } n_e, \\ \text{div } J_{i,e} &= q, \\ q &= n_e \nu_i - n_d J_{i,e d} \\ \nu_i &= \alpha \mu_e E_i\end{aligned}$$

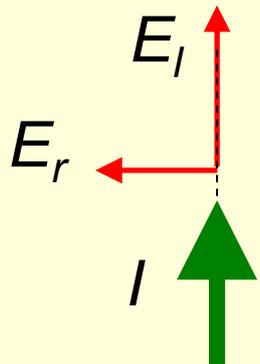
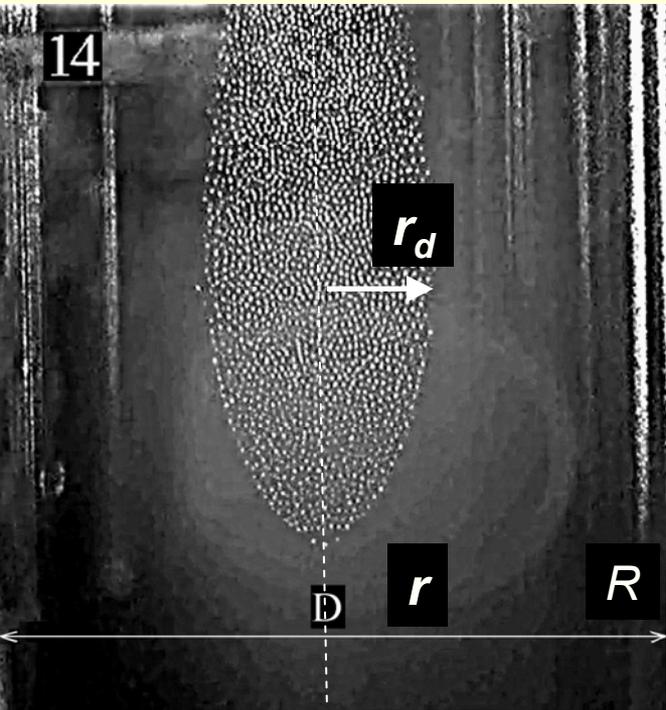
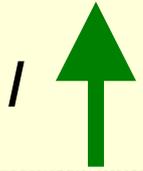
OML:

$$J_{id} = a^2 n_i V_i^2 / u_i [(1 + 2\xi^2 + 2\xi\tau) \text{erf}(\xi) + 2\xi \exp(-\xi^2)],$$

$$J_{id} = (8\pi)^{1/2} a^2 n_i V_i (1 - e^{\phi/T_i}) \quad (\text{при } u_i < V_i)$$

$$J_{ed} = (8\pi)^{1/2} a^2 n_e V_e \exp(e\phi/T_e) \quad (\text{при } u_e \ll V_e)$$

$$\text{где } \xi = u_i / 2^{1/2} V_i, \quad \zeta = -e\phi/T_e, \quad \tau = T_e/T_i.$$



Условие электронейтральности:

$$n_i = n_e + |Z_d| n_d$$

Нормировка по току:

$$I = 2\pi \int_0^R \mu_e n_e(r) E_l r dr$$

Граничные условия:

$$n_{i,e}|_{r=R} = 0 \quad - \quad \text{на стенке трубки}$$

$$(dn_{i,e}/dr)|_{r=0} = 0 \quad - \quad \text{в центре трубки}$$

Метод решения:

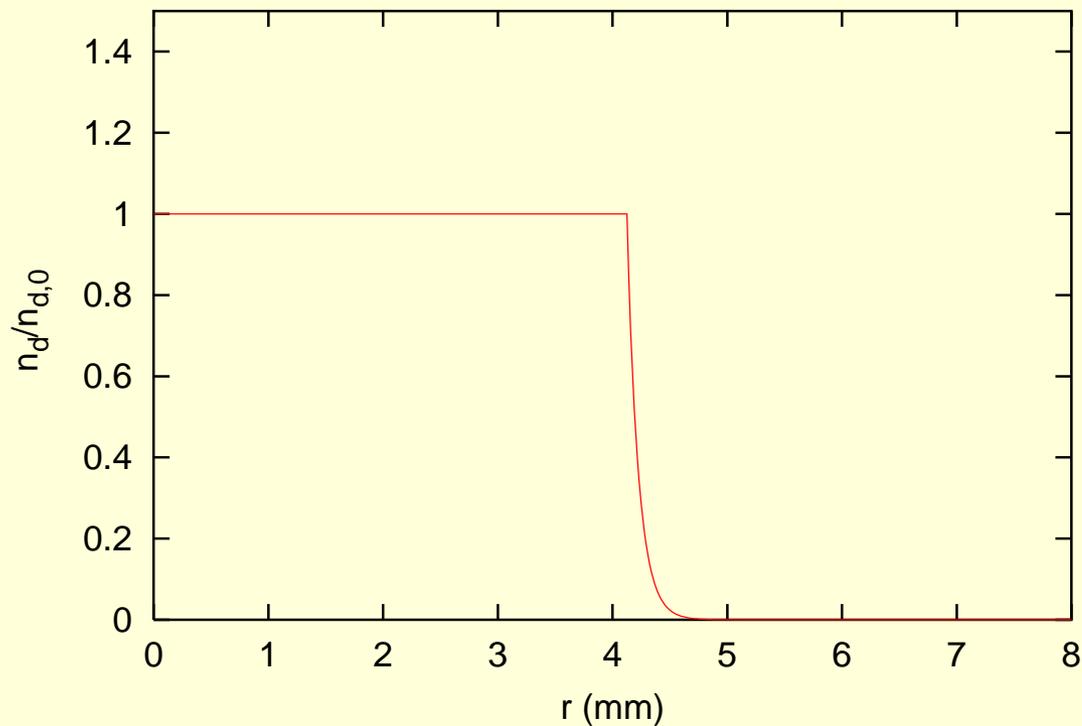
Рунге-Кутта 4-го порядка + метод «стрельбы»

Распределение частиц по радиусу трубки:

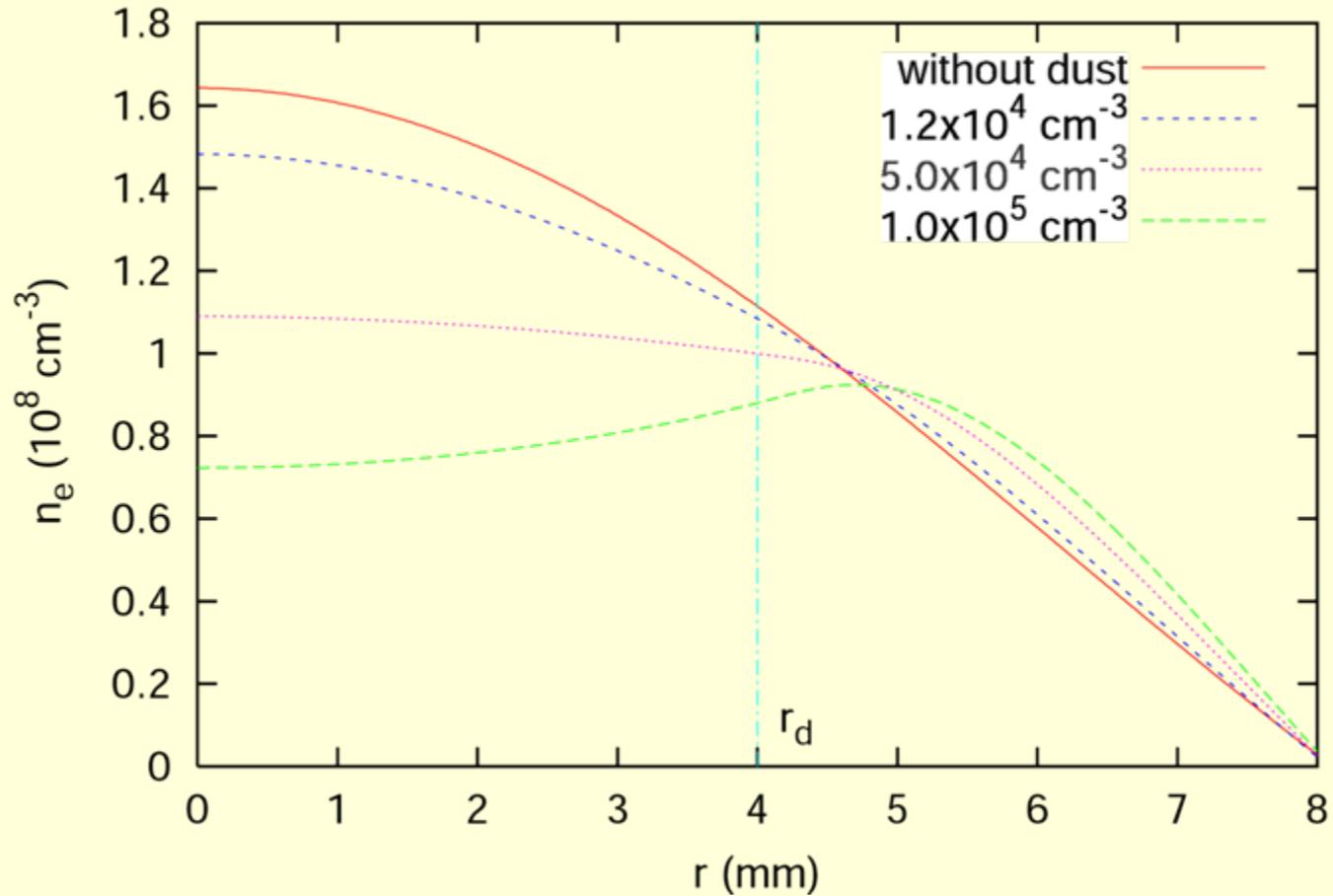
$$n_d(r) = n_{d,0} e^{(r_d - r)/0.1R}, \quad r > r_d$$

$$n_d(r) = n_{d,0}, \quad r \leq r_d$$

Размер частиц $a=2$ мкм

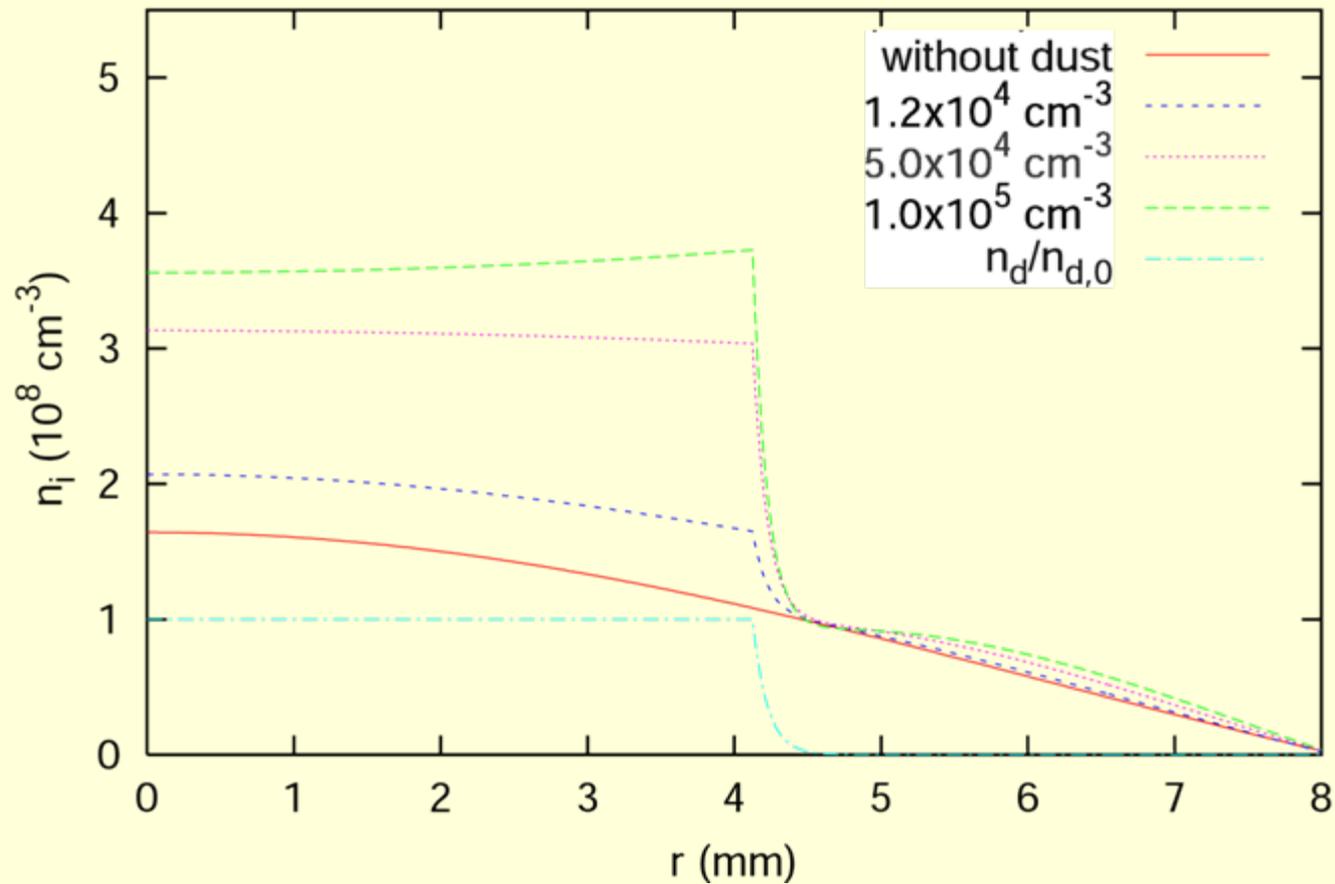


Распределение концентрации электронов



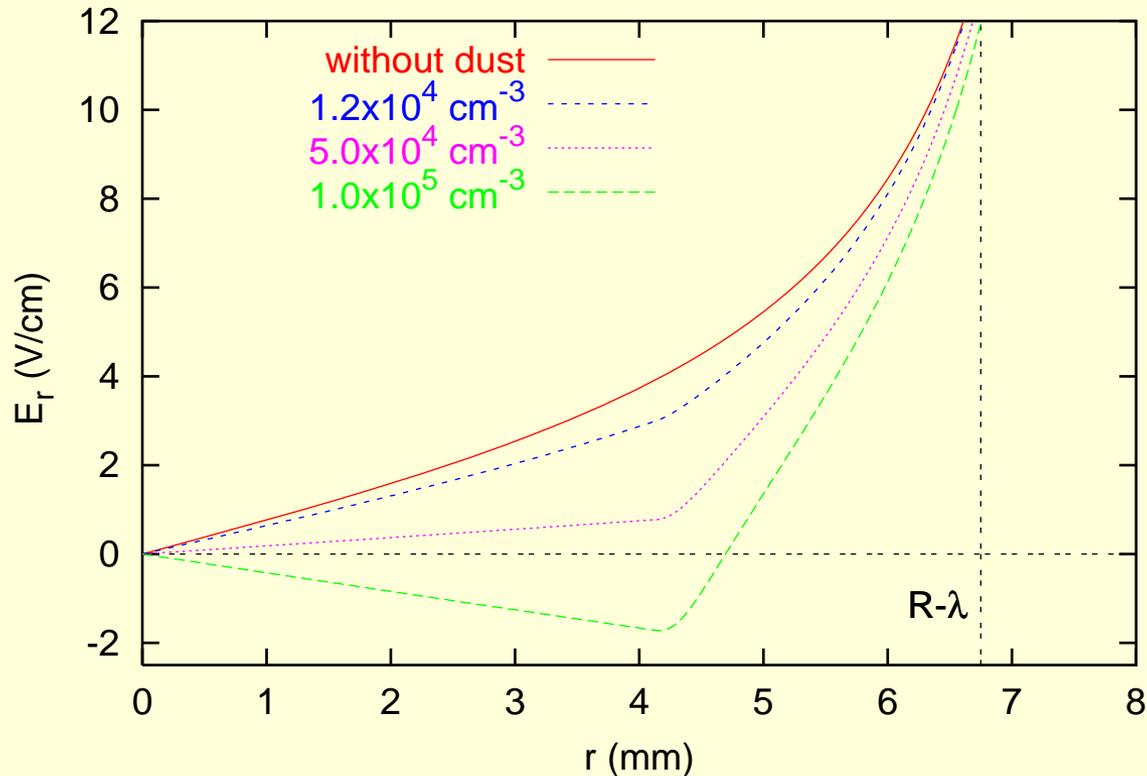
$I=0.5 \text{ mA}$, $P=0.5 \text{ Torr}$

Распределение концентрации ионов



$I=0.5 \text{ mA}$, $P=0.5 \text{ Torr}$

Напряженность радиального электрического поля



$I=0.5 \text{ mA}$, $P=0.5 \text{ Torr}$

Значения продольной компоненты электрического поля:

$E_1 = 23.2 \cdot 10^2 \text{ В/м}$, разряд без частиц (1);

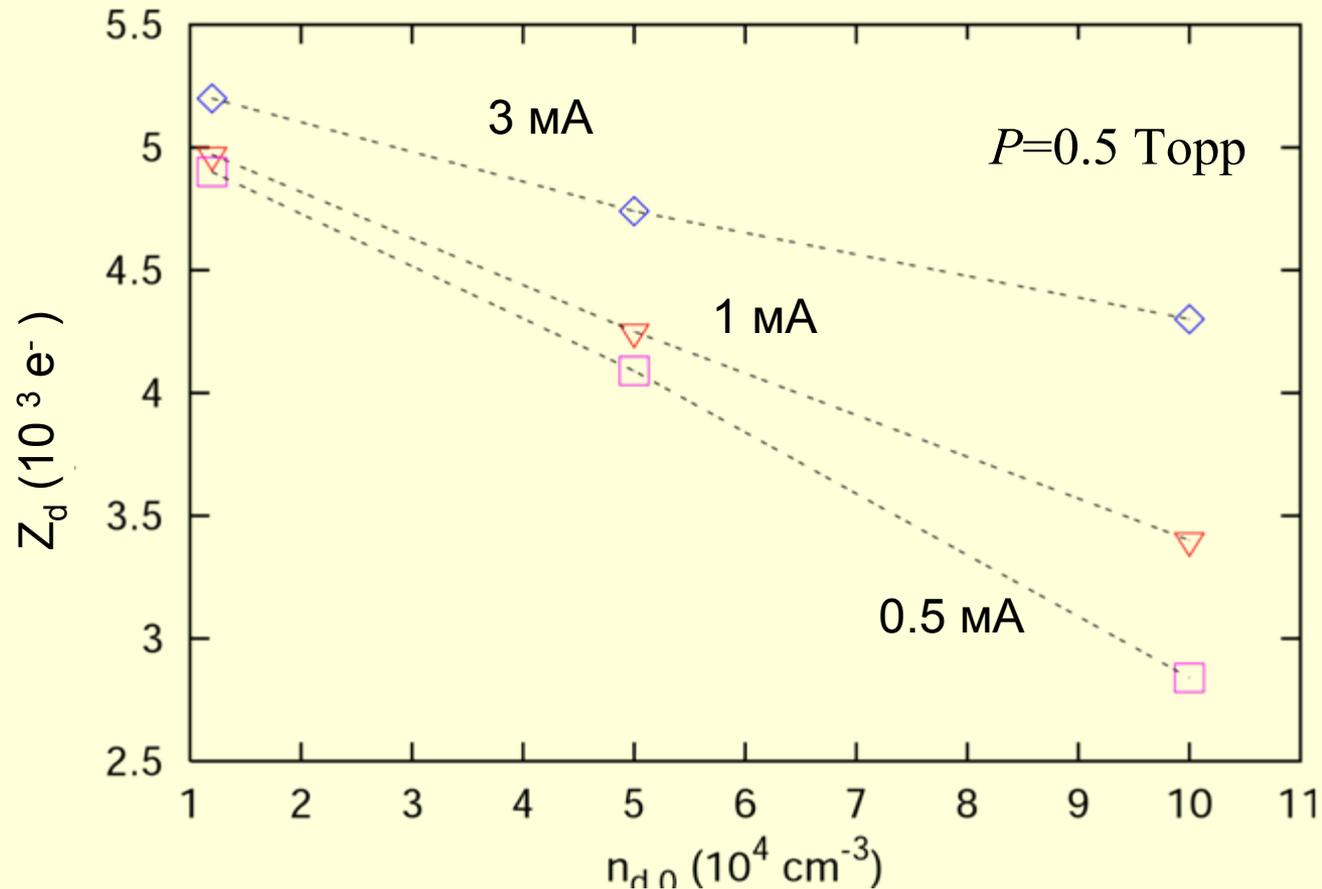
$E_1 = 23.8 \cdot 10^2 \text{ В/м}$, частиц - $1.2 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$ (2);

$E_1 = 24.9 \cdot 10^2 \text{ В/м}$, частиц - $5.0 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$ (3);

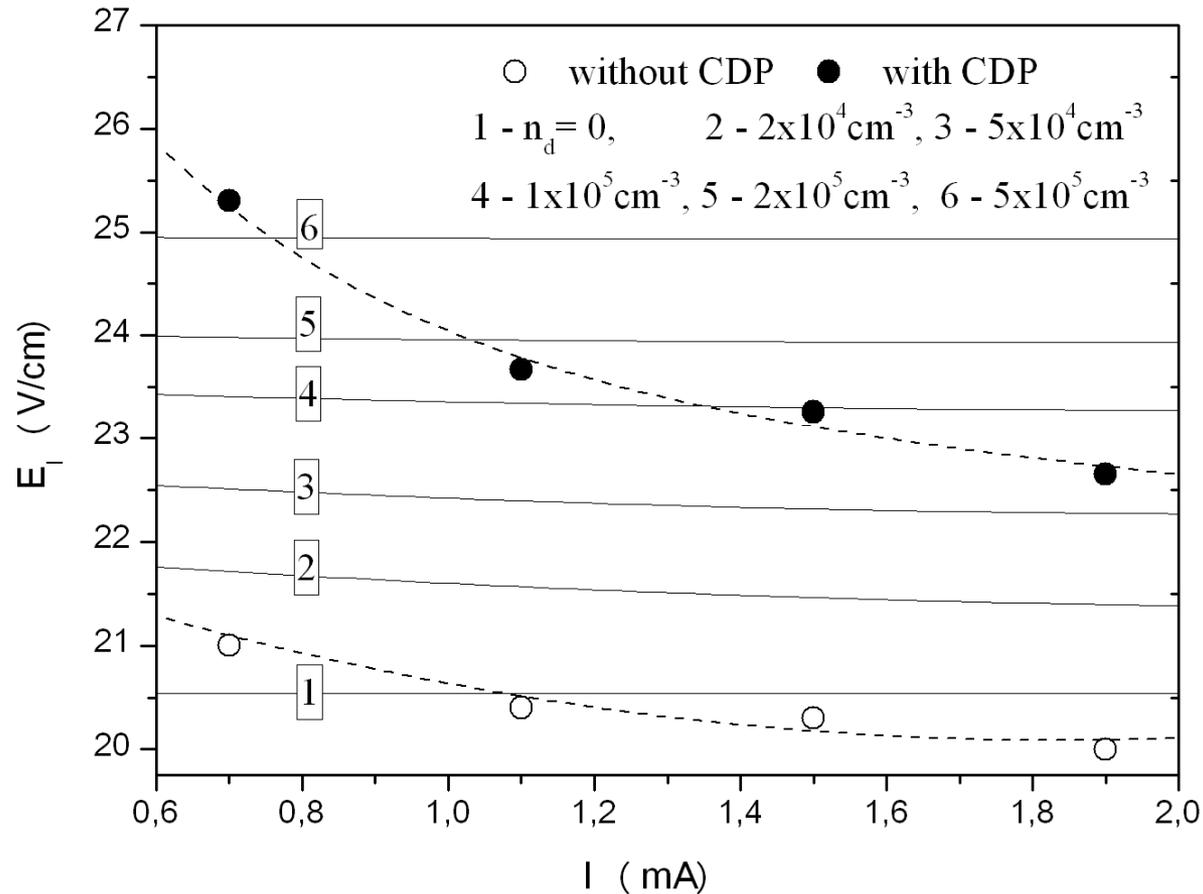
$E_1 = 26.1 \cdot 10^2 \text{ В/м}$, частиц - $1.0 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$ (4).

Заряд пылевых частиц

Равенство потоков $J_{id} = J_{ed}$ определяет равновесный заряд пылевой частицы: $Z_d = 4\pi\epsilon_0 a\phi / e$



Напряженность продольного электрического поля



$P=0.43$ Торр

Заключение

Предложена модель описания влияния пылевых частиц с заданным пространственным распределением на интегральные характеристики и распределения компонент плазмы в однородном положительном столбе тлеющего разряда:

- плазма разряда описывается в рамках диффузионного приближения;
- потоки ионов и электронов на поверхность пылевых частиц описываются в приближении OML.

Заполнение частицами центральной части сечения разряда снижает концентрацию свободных электронов в разряде, вплоть до образования локального минимума на оси разряда.

С ростом концентрации пылевых частиц напряженность радиального электрического поля E_r падает. При достижении определенной концентрации пылевых частиц E_r становится отрицательным, то есть меняет направление, в некоторой области внутри пылевого облака.

Напряженность продольного поля E_l при наличии пылевых частиц возрастает. Рассчитанные зависимости напряженности поля от тока разряда (ВАХ) согласуются с экспериментальными данными.

Литература

1. **Ваулина О.С., Петров О.Ф., Фортвов В.Е., Храпак А.Г., Храпак С.А.** Пылевая плазма: эксперимент и теория. М.: Физматлит, 2009. 316 с.
2. **Maigorov S A., Vladimirov S.V., Cramer N.F.** Plasma kinetics around a dust grain in an ion flow // *Phys. Rev. E*. 2001. V. 63. P. 017401.
3. **Олеванов М.А., Манкелевич Ю.А., Рахимова Т.В.** О влиянии пылевых частиц на свойства низкотемпературной плазмы // *ЖЭТФ*. 2003. Т. 123. № 3. С. 503-517.
4. **Sukhinin G.I., Fedoseev A.V., Antipov S.N., Petrov O.F., Fortov V.E.** Influence of dust particles concentration on plasma parameters in DC discharge // *Contrib. Plasma Phys.* 2009. V. 49(10). P. 781-785.
5. **Сухинин Г.И., Федосеев А.В.** Зарядка пылевых частиц в неравновесной плазме стратифицированного тлеющего разряда // *Физика плазмы*. 2007. Т.33. № 12. С. 1117-1126.
6. **Швейгерт И.В., Питерс Ф.М.** Влияние размера наночастиц на свойства емкостного высокочастотного разряда // *Письма в ЖЭТФ*. 2007. Т. 86. № 9. С. 657-661.
7. **Василяк Л.М., Ветчинин С.П., Зимнухов В.С., Нефедов А.П., Поляков Д.Н., Фортвов В.Е.** Плазменно-пылевые структуры при криогенных температурах // *ДАН*. 2002. Т. 382. С. 50-53.
8. **Василяк Л.М., Ветчинин С.П., Обивальнева А.А., Поляков Д.Н.** Динамика пылевых структур в плазме при модуляции высокочастотного напряжения разряда // *ПЖТФ*. 2008. Т.34. № 16. С.14-21.
9. **Василяк Л.М., Ветчинин С.П., Нефедов А.П., Поляков Д.Н.** Упорядоченные структуры из микрочастиц в тлеющем разряде // *ТВТ*. 2000. Т. 38. № 5. С.701-705.
10. **Fortov V.E., Morfill G.E.** Complex and Dusty Plasmas. From Laboratory to Space. CRC Press. 2009.
11. **Райзер Ю.П.** Физика газового разряда. М.: Наука. 1992. 536 с.
12. **Allen J.E.** Probe theory – the orbital motion approach // *Phys. Scripta*. 1992. V. 45(5). P. 497-503.
13. **Балабанов В.В., Василяк Л.М., Ветчинин С.П., Нефедов А.П., Поляков Д.Н., Фортвов В.Е.** Влияние градиента температуры газа на пылевые структуры в плазме тлеющего разряда // *ЖЭТФ*. 2001. Т. 119. Вып. 1. С. 99-106.
14. **Василяк Л.М., Ветчинин С.П., Поляков Д.Н., Фортвов В.Е.** Кооперативный характер образования пылевых структур в плазме // *ЖЭТФ*. 2002. Т. 121. № 3. С. 609-613.
15. **Kreher J., Stern W.** Increased power concentration and its effect on the discharge parameters on the low pressure Hg-rare gas positive column III. Effects of an axial rod // *Contrib. Plasma Phys.* 1989. V. 29(6). P. 643-654.
16. **Khrapak S.A., Ratynskaya S., Zobnin A.V., Yaroshenko V.V., Thoma M.H., Kretschmer M., Usachev A.D., Hoefner H., Morfill G.E., Petrov O.F., Fortov V.E.** Particle charge in the bulk of gas discharges // *Phys. Rev. E*. 2005. V. 72. P. 016406.
17. **Losseva T V, Popel S I, Yu M Y and Ma J X** 2007 Ambipolar diffusion in complex plasma *Phys. Rev. E* **75** 046403