

Модель положительного столба разряда постоянного тока с пылевой компонентой

Зобнин Андрей Вячеславович

ОИВТ РАН

Механизмы влияния пылевой компоненты на структуру разряда

- Заряд пылевых частиц меняет условие квазинейтральности ($n_e \neq n_i$).
- «Трение» ионов о пылевую компоненту уменьшает подвижность ионов в облаке.
- Рекомбинация электронов и ионов на пылевых частицах меняет условия существования стационарного разряда.

Кинетическая модель разряда

- Анизотропия функции распределения электронов мала (двучленное приближение).
- Длина энергетической релаксации электронов велика по сравнению с радиусом разрядной трубки.
- Малая степень ионизации (пренебрегается электрон-ионными столкновениями).
- Дрейфовое приближение для ионов.

Расчет функции распределения электронов в координатах полная энергия-координата

кинетическое уравнение

$$1/r \frac{\partial}{\partial r} \left[r D_\varepsilon \frac{\partial f_0(\varepsilon, r, z)}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[D_\varepsilon \frac{\partial f_0(\varepsilon, r, z)}{\partial z} \right] = S^{exc} + S^i + S^d$$

$\varepsilon = U - e\varphi(r, z)$ - полная энергия электрона (e - модуль заряда электрона)

$$D_\varepsilon = \frac{U}{3N\sigma_{tot}(U)}$$

$$S^{exc} = \sum_k \left[UN_0 \sigma_k(U) f_0(\varepsilon, r, z) - (U + U_k^{exc}) N_0 \sigma_k(U + U_k^{exc}) f_0(\varepsilon + U_k^{exc}, r, z) \right]$$

$$S^i = \sum_k \left[UN_k \sigma_k^i(U) f_0(\varepsilon, r, z) - 2N_k \int_0^\infty \frac{(U + U_k^i + t) \sigma_k^i(U + U_k^i + t) f_0(\varepsilon + U_k^i + t, r, z)}{U + t} dt \right]$$

$$S^d = n_d \pi a^2 (U + e\varphi_s) f_0(\varepsilon, r, z) \quad \varphi_s = -e \frac{Z_e}{a}$$

Нелокальное приближение

После интегрирования по радиусу трубки

$$\frac{\partial}{\partial z} \left[D(\varepsilon, z) \frac{\partial f_0(\varepsilon, z)}{\partial z} \right] = \sum_k \left[K_k(\varepsilon, z) f_0(\varepsilon, z) - K_k(\varepsilon + U_k^{exc}, z) f_0(\varepsilon + U_k^{exc}, z) \right] + K^i(\varepsilon, z) f_0(\varepsilon, z) + K^r(\varepsilon, z) f_0(\varepsilon, z) - Si(\varepsilon, z) + Sw(\varepsilon, z)$$

$$D(\varepsilon, z) = \int_0^R \frac{\varepsilon + e\varphi(r, z)}{3N\sigma_{tot}(\varepsilon + e\varphi(r, z))} \theta(\varepsilon + e\varphi(r, z)) r dr$$

$$K_k(\varepsilon, z) = \int_0^R (\varepsilon + e\varphi(r, z)) N \sigma_k^{exc}(\varepsilon + e\varphi(r, z)) r dr$$

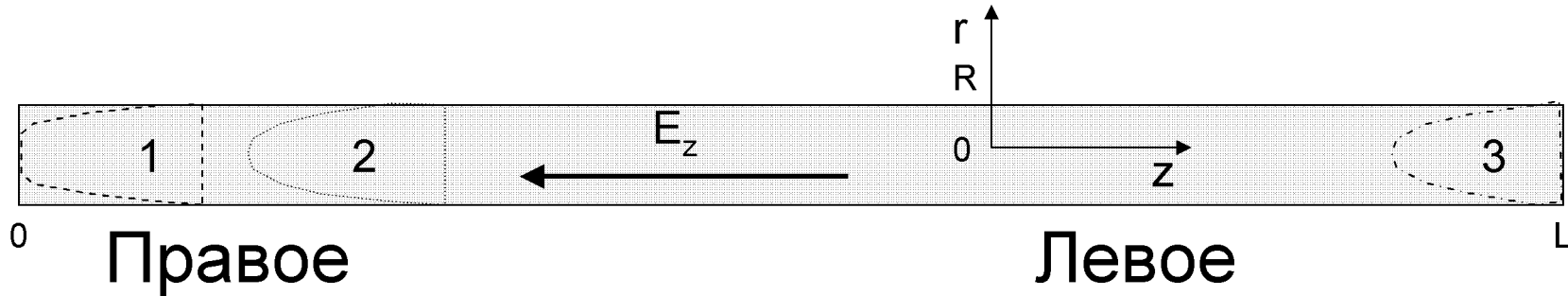
$$K^i(\varepsilon, z) = \int_0^R (\varepsilon + e\varphi(r, z)) N \sigma^i(\varepsilon + e\varphi(r, z)) r dr + \int_0^R (\varepsilon + e\varphi(r, z)) N^* \sigma^{i*}(\varepsilon + e\varphi(r, z)) r dr$$

$$K^d(\varepsilon, z) = \int_0^R (\varepsilon + e\varphi(r, z) + e\varphi_s(r, z)) n_d(r, z) \pi a^2 \theta(\varepsilon + e\varphi(r, z) + e\varphi_s(r, z)) r dr$$

$$Si(\varepsilon, z) = 2 \int_0^\infty \tilde{K}^i(\varepsilon + U^i + t, z) f_0(\varepsilon + U^i + t, z) dt + 2 \int_0^\infty \tilde{K}^{i*}(\varepsilon + U^{i*} + t, z) f_0(\varepsilon + U^{i*} + t, z) dt \quad \tilde{K}^i(\varepsilon, z) = \int_0^R (\varepsilon + e\varphi(r, z)) N \frac{\sigma^i(\varepsilon + e\varphi(r, z))}{\varepsilon + e\varphi(r, z) - U^i} r dr$$

$$Sw(\varepsilon, z) = \frac{(\varepsilon - e\varphi(R, z))}{4} R f_0(\varepsilon, z) \theta(\varepsilon + e\varphi(R, z))$$

Граничные условия



$$1 \quad f_0(\varepsilon, z) \Big|_{\varepsilon + e\varphi(R, z) = 5\hat{y}\hat{A}} = 0$$

$$2 \quad f_0(\varepsilon, z) \Big|_{\varepsilon + e\varphi(R, z) = 5\hat{y}\hat{A}} = 0$$

$$3 \quad f_0(\varepsilon, L) = f_0^{\text{зад}}(\varepsilon - e\varphi(0, L))$$

$$f_0(\varepsilon, 0) = f_0^{\text{зад}}(\varepsilon)$$

$$\frac{\partial f_0(\varepsilon, z)}{\partial z} \Big|_{\varepsilon + e\varphi(0, z) = 0} = 0$$

$$\frac{\partial f_0(\varepsilon, z)}{\partial z} \Big|_{\varepsilon + e\varphi(0, z) = 0} = 0$$

Движение ионов

- Дрейфовое приближение

$$\mathbf{J}_i = n_i \mathbf{E} \tilde{\mu} \quad \tilde{\mu} = \frac{\mu}{1 + \mu \gamma_{dr} n_d m_i / e}$$

$$\mu = \frac{\mu_0}{\sqrt{1 + \alpha E}} \quad \gamma_{dr} = \frac{8}{3} \pi \left(\frac{eZ}{T} \right)^2 \left(\frac{T}{m_i} \right)^{1/2} \int_0^\infty \exp(-x) \ln \left(1 + 2 \frac{\lambda_D T}{eZ} x \right) dx$$

$$\text{div}(\mathbf{J}_i) = S_i - S_d$$

$$S_i = \sqrt{\frac{2}{m_e}} \int_{-e\varphi(r,z)+U^i}^{-e\varphi(R,z)+5\hat{y}\hat{A}} (\varepsilon + e\varphi(r,z)) N \sigma^i(\varepsilon + e\varphi(r,z)) f_0(\varepsilon, r, z) +$$

$$+ \sqrt{\frac{2}{m_e}} \int_{-e\varphi(r,z)+U^{i*}}^{-e\varphi(R,z)+5\hat{y}\hat{A}} (\varepsilon + e\varphi(r,z)) N^* \sigma^{i*}(\varepsilon + e\varphi(r,z)) f_0(\varepsilon, r, z)$$

$$S_d = n_d \pi a^2 \sqrt{\frac{2}{m_e}} \int_{-e\varphi - e\varphi_s}^{-e\varphi(R,z)+5\hat{y}\hat{A}} (\varepsilon + e\varphi(r,z) + e\varphi_s) f_0(\varepsilon, r, z) d\varepsilon$$

Заряд пылевых частиц

Ток ионов

$$I_i = en_i a^2 \sqrt{\frac{8\pi T}{m_i}} \left(1 + \frac{e\varphi_s}{T}\right) \left(1 + \frac{-\tilde{v} \frac{ae\varphi_s}{\lambda_D T}}{0.07 + 2 \cdot \frac{a}{\lambda_D} + 2.5 \cdot \frac{a}{\lambda_D} \tilde{v} - \left(0.27 \cdot \left(\frac{a}{\lambda_D}\right)^{3/2} + 0.8 \cdot \left(\frac{a}{\lambda_D}\right)^2 \tilde{v}\right) \frac{e\varphi_s}{T} - 0.4 \tilde{v}^2 \left(\frac{a}{\lambda_D}\right)^2 \frac{e\varphi_s}{T \left(1 - 0.4 \frac{a}{\lambda_D} \tilde{v}\right)}}\right)$$

$$\tilde{v} = \frac{e\lambda_D}{\mu \sqrt{T m_i}}$$

Электронный ток

$$I_e = e\pi a^2 \sqrt{\frac{2}{m_e}} \int_{-e\varphi - e\varphi_s}^{-e\varphi(R,z) + 5\gamma A} (\varepsilon + e\varphi(r,z) + e\varphi_s) f_0(\varepsilon, r, z) d\varepsilon$$

Заряд

$$eZ = \varphi_s a$$

Расчет радиального поля

$$4\pi q(n_e + Zn_d + q/e)\tilde{\mu} + (\mathbf{E}, \mathbf{grad}((n_e + Zn_d + q/e)\tilde{\mu})) = S_i + S_d$$

Где $q = e(n_i - n_e - Zn_d)$ - плотность заряда

После подстановки $q = 4\pi \mathbf{div}(\mathbf{E}) + \delta q$ получается уравнение для поправки δq , которое решалось в предположении, что $\mathbf{E} = \mathbf{grad}(\varphi)$ и n_e заданы. Поправка $\delta\varphi$ находилась путём решения уравнения Пуассона $\delta\varphi = 4\pi\Delta(\delta q)$

с граничными условиями $\delta\varphi = 0$ на стенках трубки и $\frac{\partial\delta\varphi}{\partial z} = 0$ в начальном и

конечном сечениях. Новый профиль потенциала находился по формуле:

$$\varphi^{(1)}(r, z) = \varphi^{(0)}(R, z) + \left(\varphi^{(0)}(r, z) + \delta\varphi(r, z) - \varphi^{(0)}(R, z) \right) \frac{\varphi^{(0)}(0, z) - \varphi^{(0)}(R, z)}{\varphi^{(0)}(0, z) + \delta\varphi(0, z) - \varphi^{(0)}(R, z)} (1 + \chi(z))$$

где $\chi(z)$ бралась пропорциональной сглаженной производной тока разряда по z .

Расчет продольного поля

Продольное поле (профиль потенциалов на стенке трубки $\varphi(R, z)$)
определялся требованием минимизации невязки $\delta\varphi(0, z)$ и
приближения тока разряда к заданному значению. Для этого к исходному
распределению потенциалов добавлялась поправка, пропорциональная

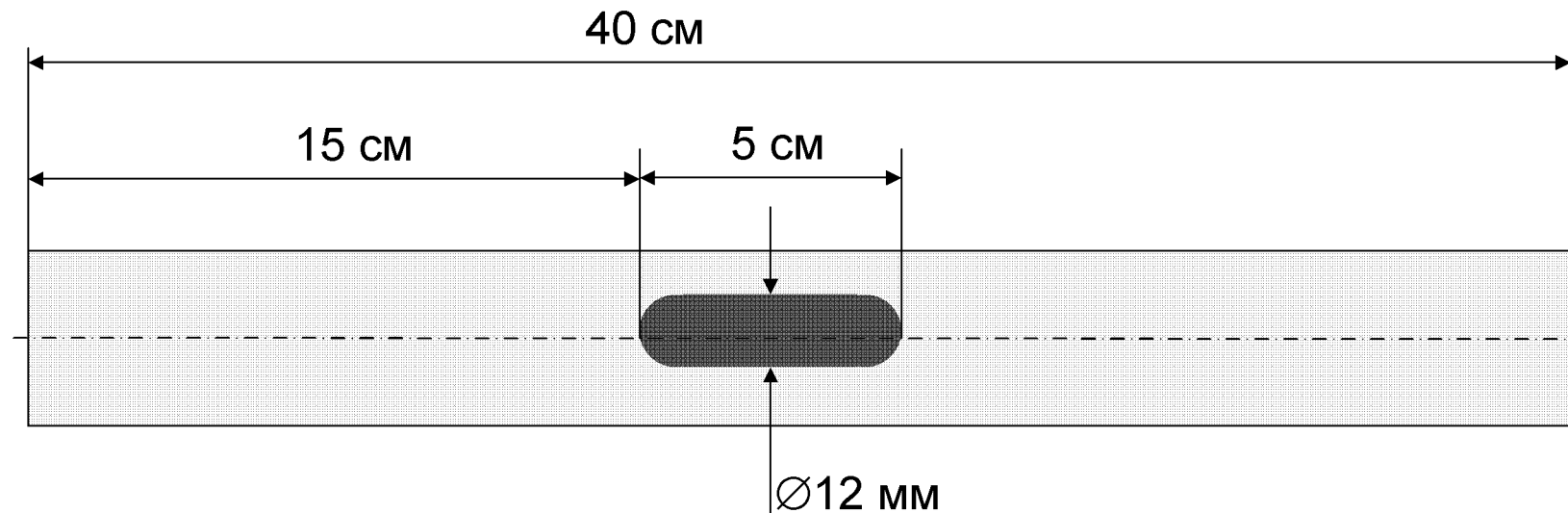
$$- \int \delta\varphi(0, z) dz + (I_0 - I_{calc}(z)) .$$

Результаты расчета

- Заданные параметры

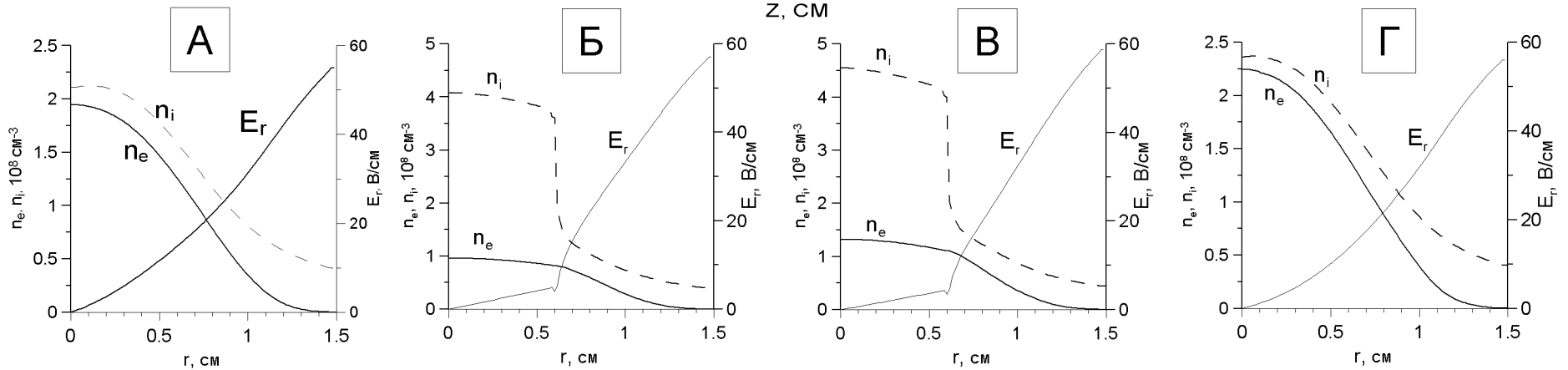
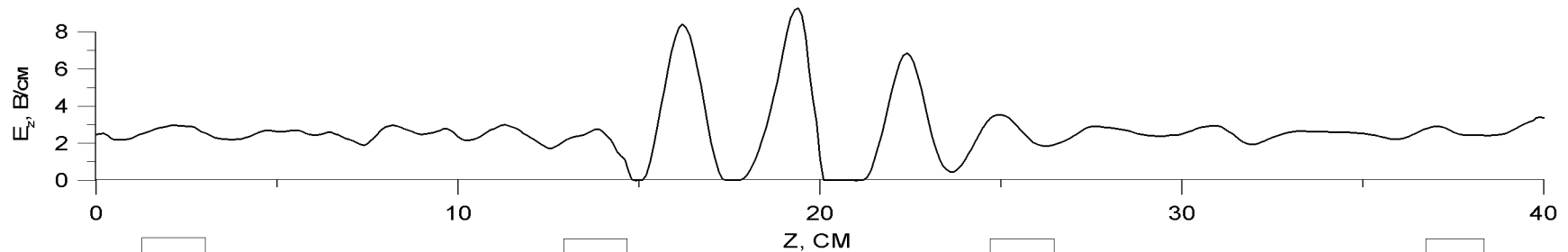
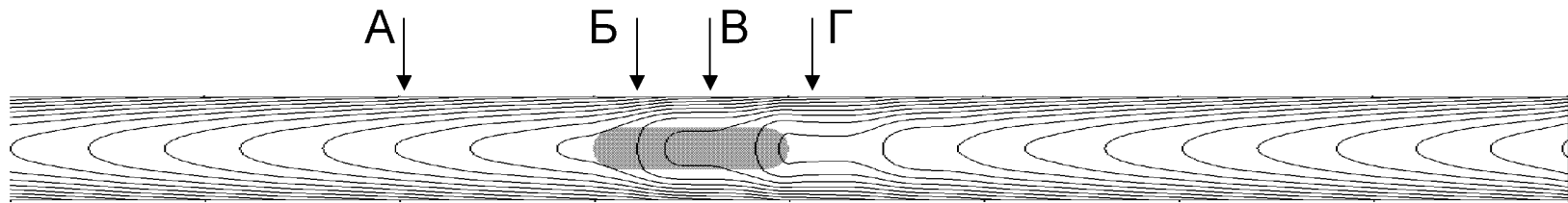
$P=20$ Па Ne, $I_0=1$ мА, $R=15$ мм

$a=0.6$ мкм, $n_d=200\ 000$ см⁻³



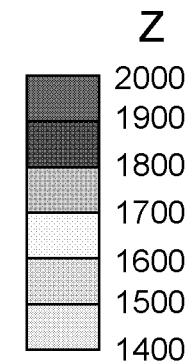
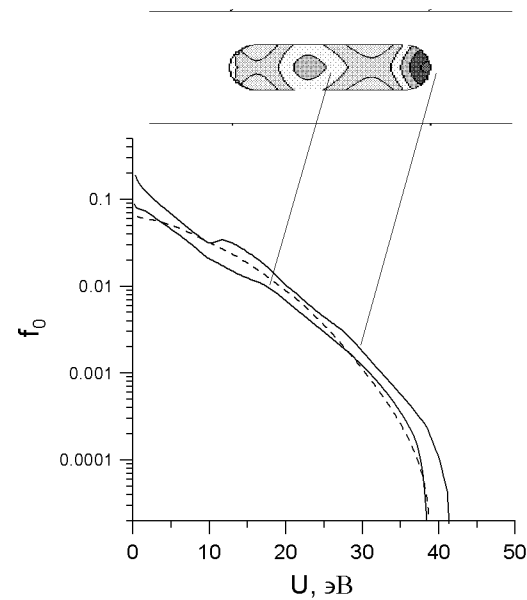
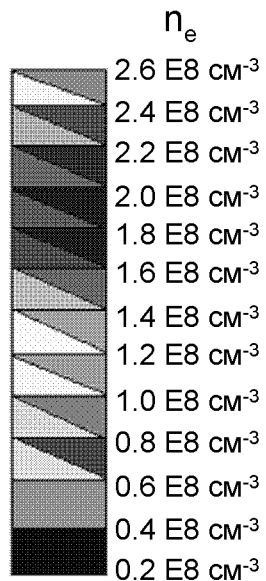
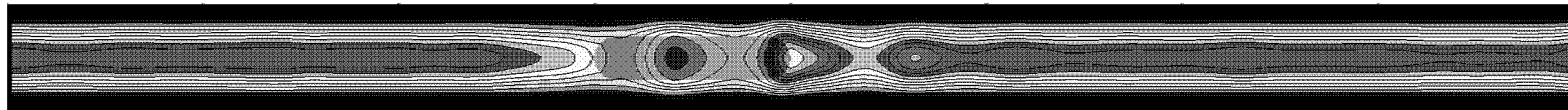
Результаты расчета

Профили эквипотенциальных поверхностей с шагом 5 В.



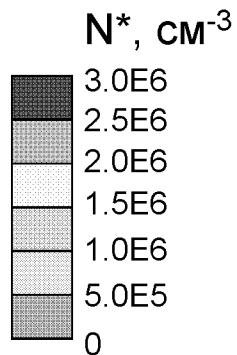
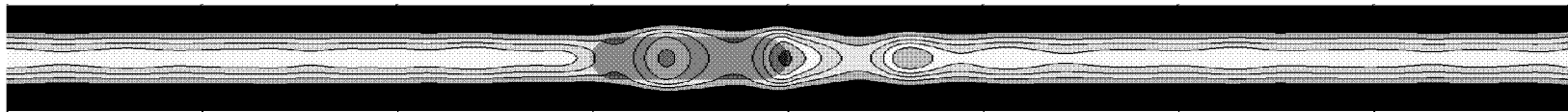
Результаты расчета

Пространственное распределение концентрации электронов и зарядов пылевых частиц.

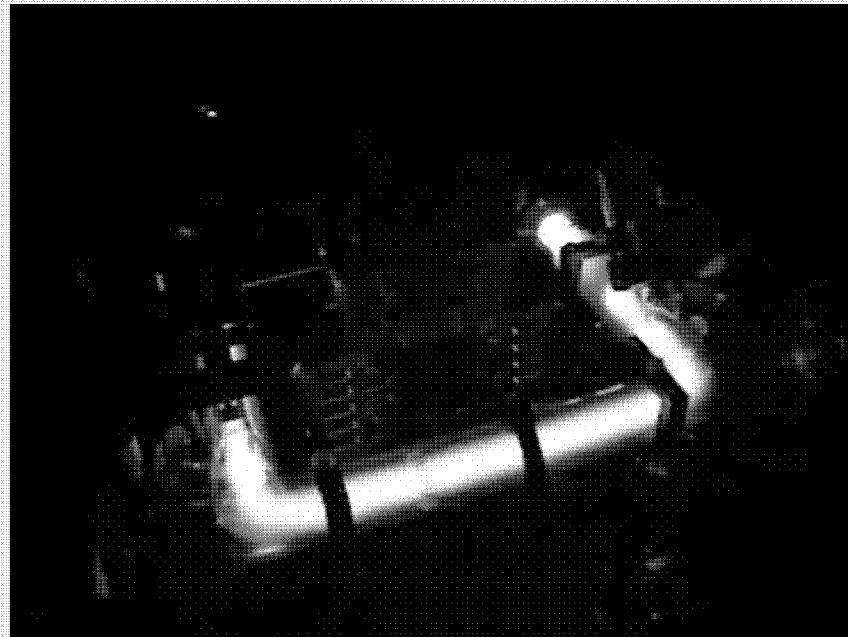


Результаты расчета

Распределение возбужденных атомов неона
 $3p'[1/2]_0$ (линия излучения 585 нм).



Влияние вброса
частиц на свечение
разряда в неоне
в условиях
микрогравитации
(эксперименты
по программе ПК-4,
параболические
полеты 2007)



Работа выполнена при поддержке
Российского фонда фундаментальных
исследований, грант РФФИ № 06-02-17520-а

Спасибо за внимание!