



INSTITUTE  
OF EXPERIMENTAL  
AND THEORETICAL  
PHYSICS

AL FARABI  
KAZAKH NATIONAL  
UNIVERSITY



# О динамике пылевых частиц вблизи электрического зонда в плазме тлеющего разряда

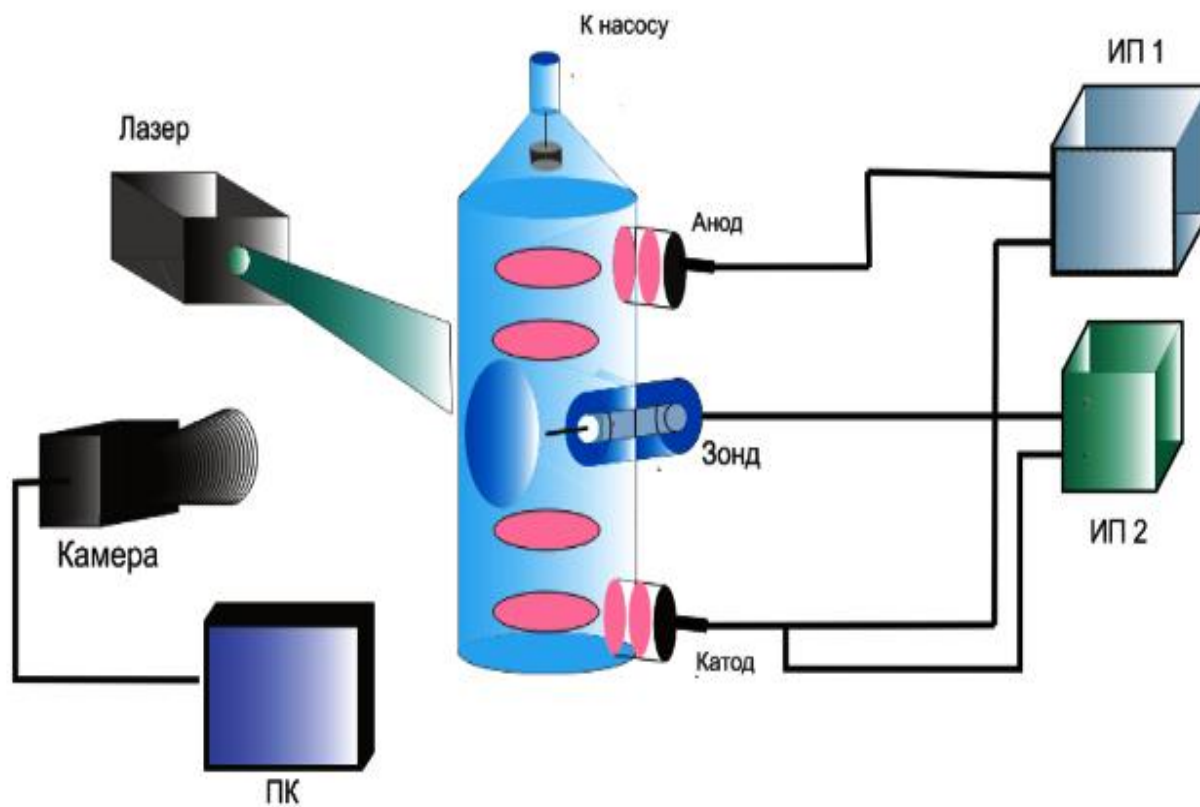
**Усенов Е.А.**, Досболаев М.К, Бастыкова Н.Х.,  
Коданова С.К., Рамазанов Т.С, Джумагулова К.Н.

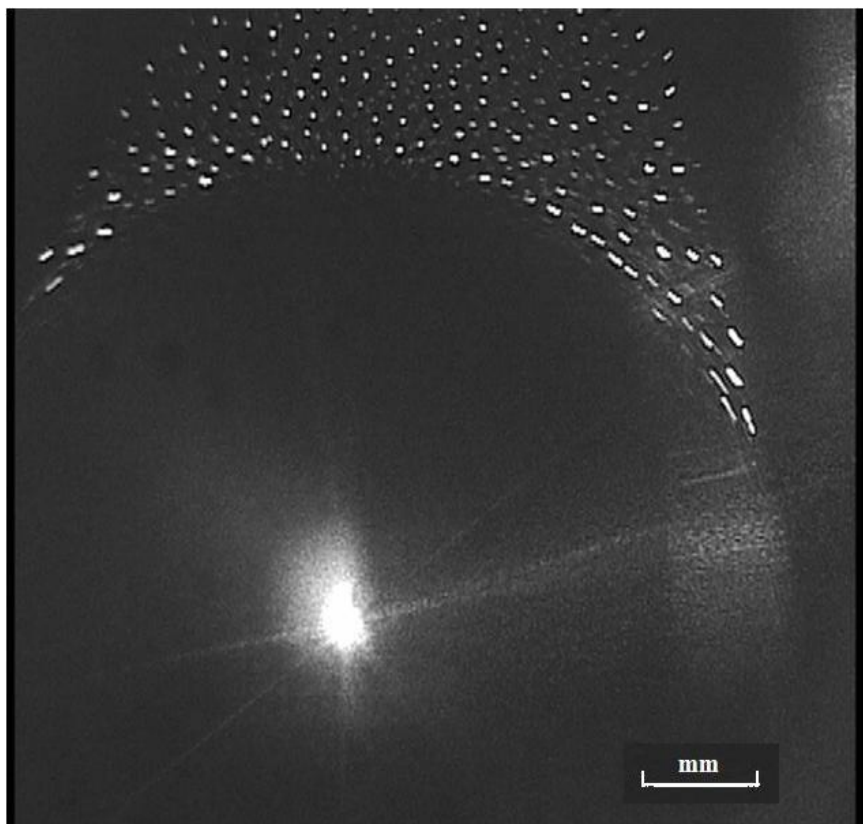
НИИЭТФ, Казахский Национальный Университет имени аль-Фараби,  
Алматы, Казахстан

# Цель работы :

- **Исследование процессов, происходящих при взаимодействии пылевых частиц с зондом**
- **Экспериментальное определение траекторий частиц при разных значениях давления в разрядной трубке**
- **Разработка теоретической модели движения пылевой частицы в возмущенной области вблизи зонда с учетом силы ионного увлечения и силы торможения нейтралами**
- **Сравнение численных расчетов с экспериментальными результатами**
- **Разработка метода определения заряда пылевой частицы**

# Экспериментальная установка



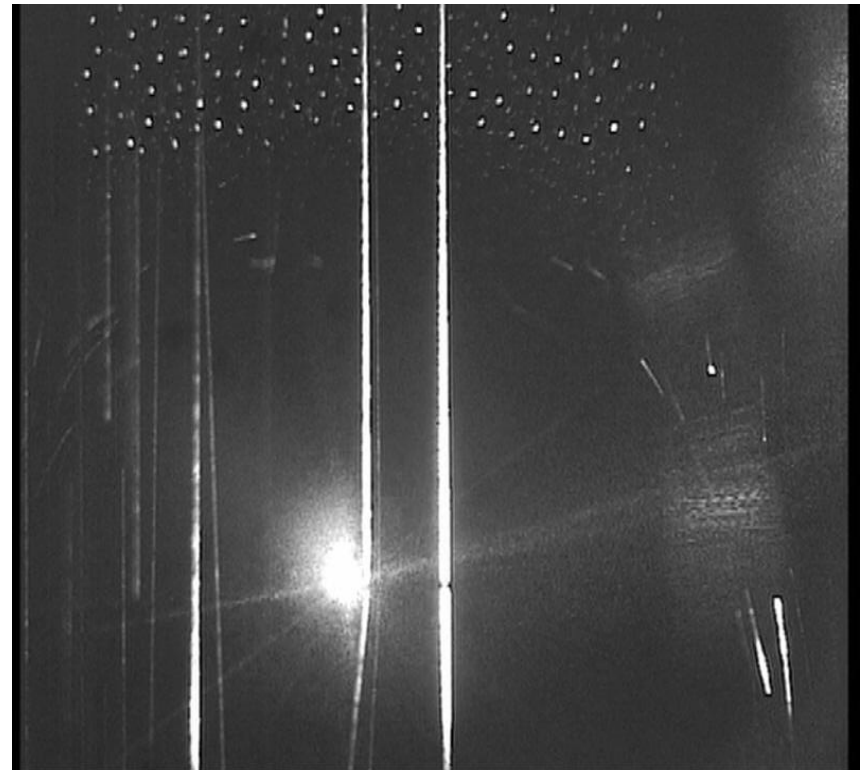
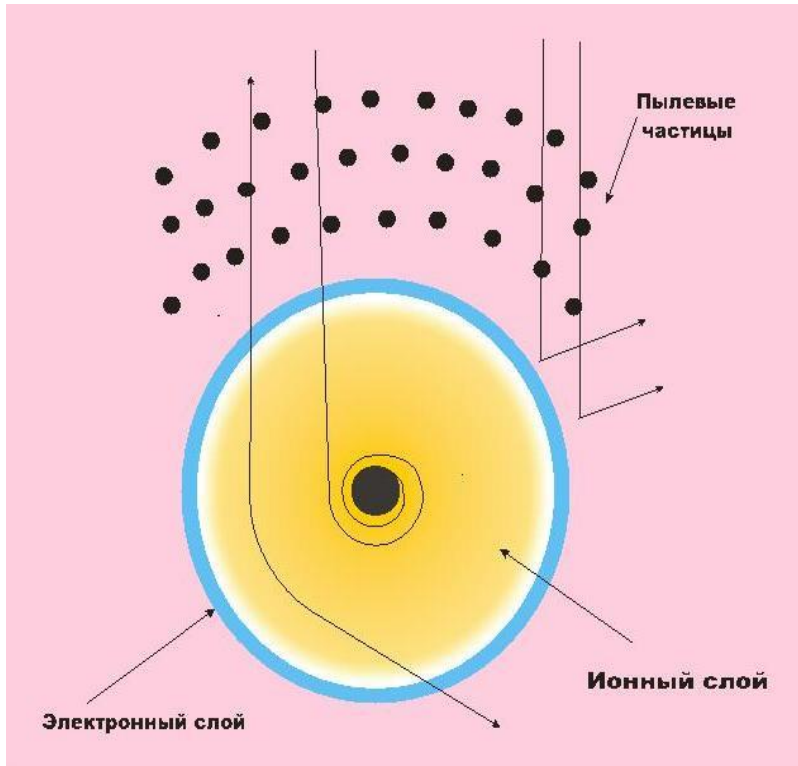


Фотоизображение пылевых частиц,  
левитирующих над слоем  
объемного заряда

Частицы, рассеянные от слоя  
объемного заряда



## Наблюдаемые процессы при взаимодействии пылевых частиц с зондом

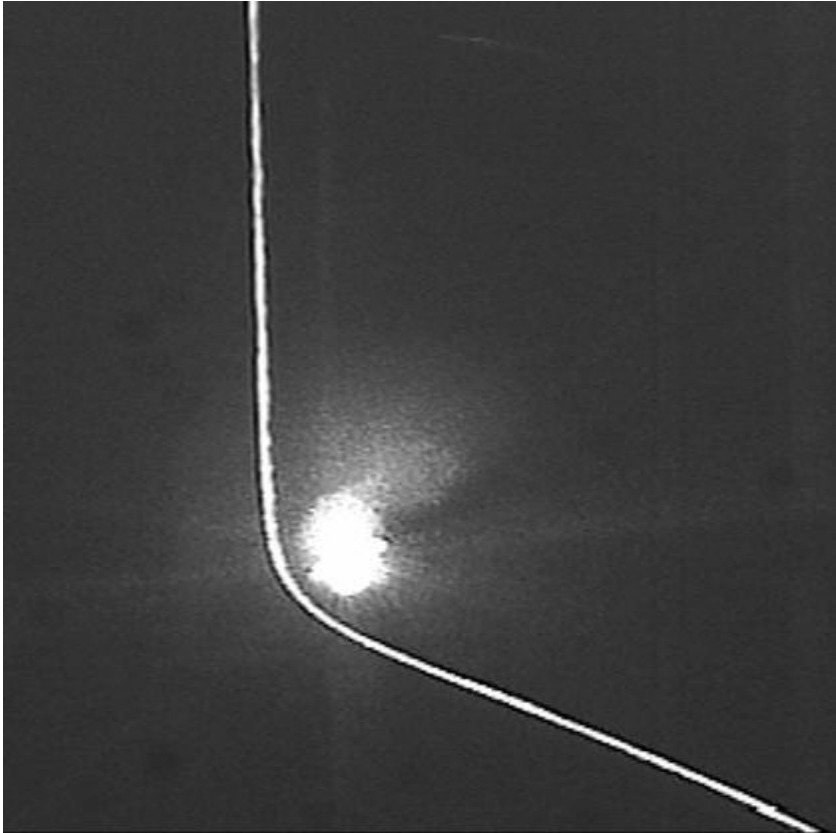


## Видеоизображения траекторий пылевых частиц

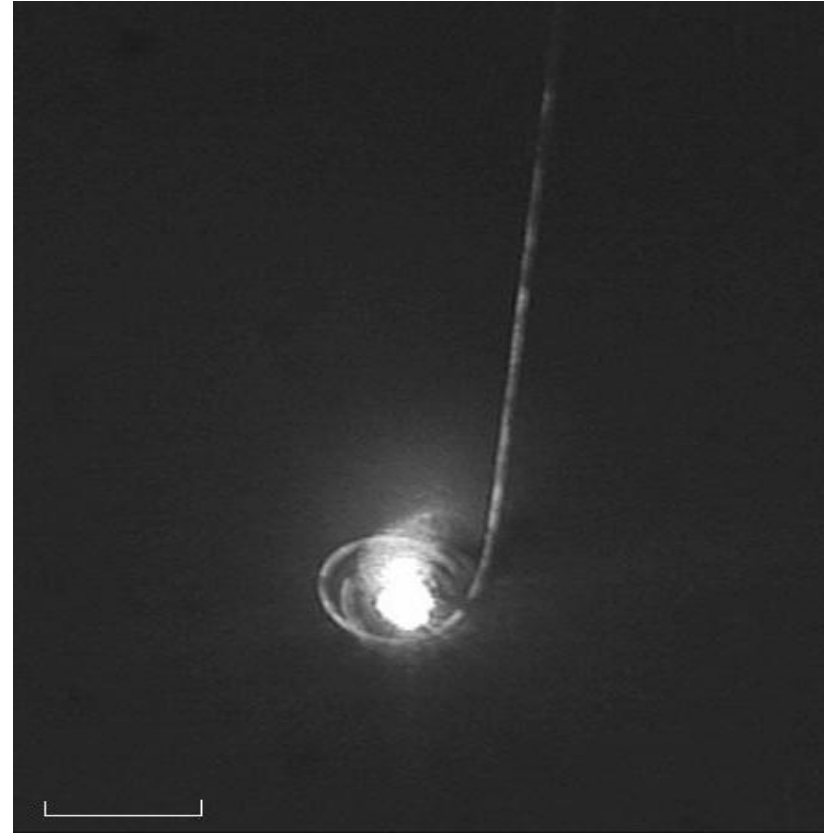


## Характерные траектории пылевых частиц

Давление в разрядной трубке  
 $P = 0.1 - 0.2 \text{ torr}$



Давление в разрядной трубке  
 $P = 0.3 \text{ torr}$

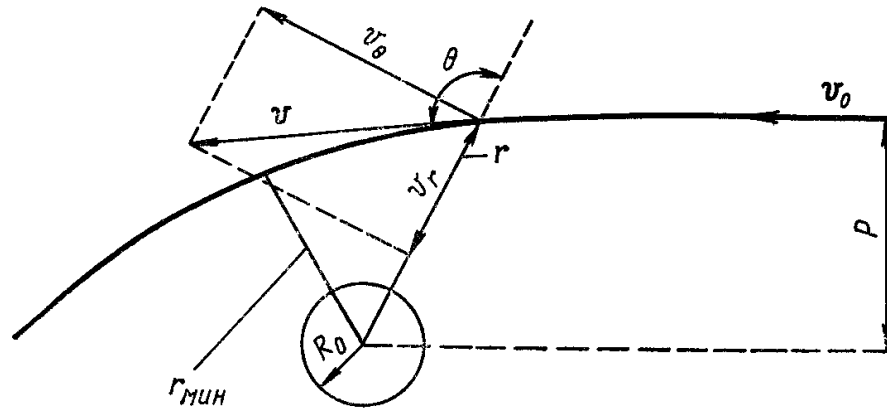


## Уравнения движения пылевых частиц вокруг зонда

$$M_d \frac{d^2 r}{dt^2} = -eZ_d(r) \frac{dU(r)}{dr} + \frac{2K_0 p^2}{r^3} - \pi R_d^2 m_n n_n u_d^2 - \pi n_i m_i u_i v_s (b_c^2 + 2b_{\pi/2}^2 \ln \Lambda)$$

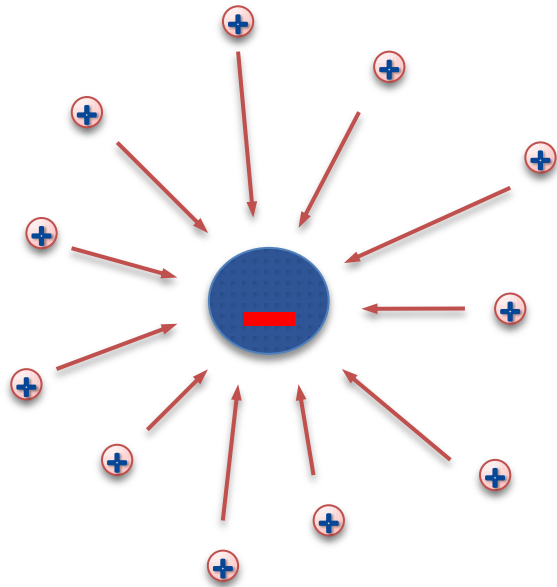
$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{p}{r^2} \left( \frac{2K_0}{M_d} \right)^{1/2}$$

где,  $U(r)$  – потенциал поля зонда в точке  $r$ ,  
 $K_0$  - начальная кинетическая энергия пылевой частицы,  $M_d$  – ее масса,  
 $p$  - прицельный параметр.





## Силы, действующие на пылевую частицу в плазме



### “Сила ионного увлечения”

$$F_i = F_{coll} + F_s = \pi n_i m_i u_i v_s (b_c^2 + 2b_{\pi/2}^2 \ln \Lambda)$$

$$b_c = R_d \left(1 - \frac{2q_i \varphi_s}{m_i v_s^2}\right)^{1/2} \quad b_{\pi/2} = \frac{eQ_d}{4\pi\epsilon_0 m_i v_s^2}$$

$$\Lambda = \frac{\lambda_D^2 + b_{\pi/2}^2}{b_c^2 + b_{\pi/2}^2} \quad v_s = \left(\frac{8k_B T_i}{\pi m_i} + u_i^2\right)^{1/2}$$

$R_d$  – радиус пылевой частицы

$m_i$  – масса ионов

$\varphi_s$  – поверхностный потенциал частицы

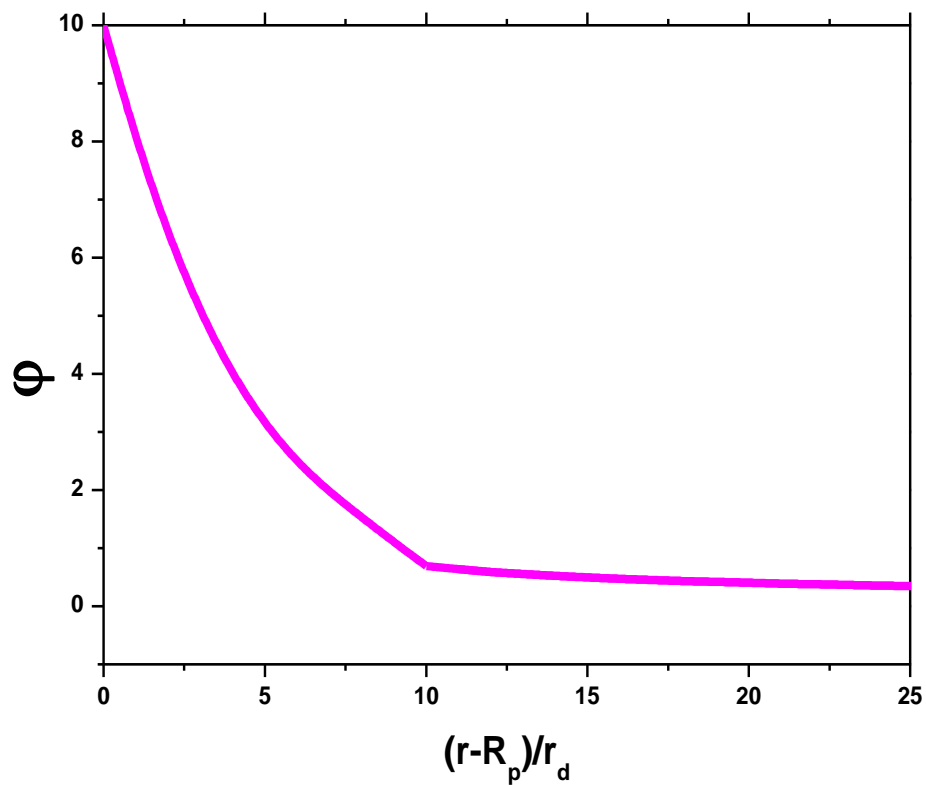
$u_i$  – дрейфовая скорость ионов

$Q_d$  – заряд пылевой частицы

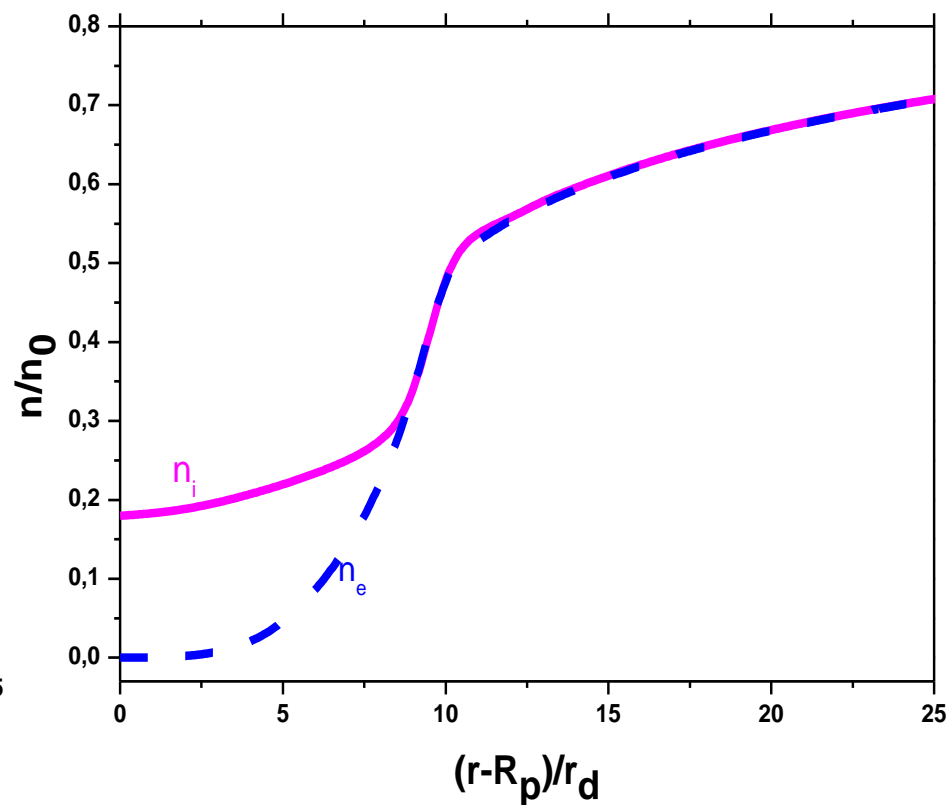
### “Сила торможения нейтралами”

$$F_{nd} = -\pi R_d^2 m_n n u_d^2$$

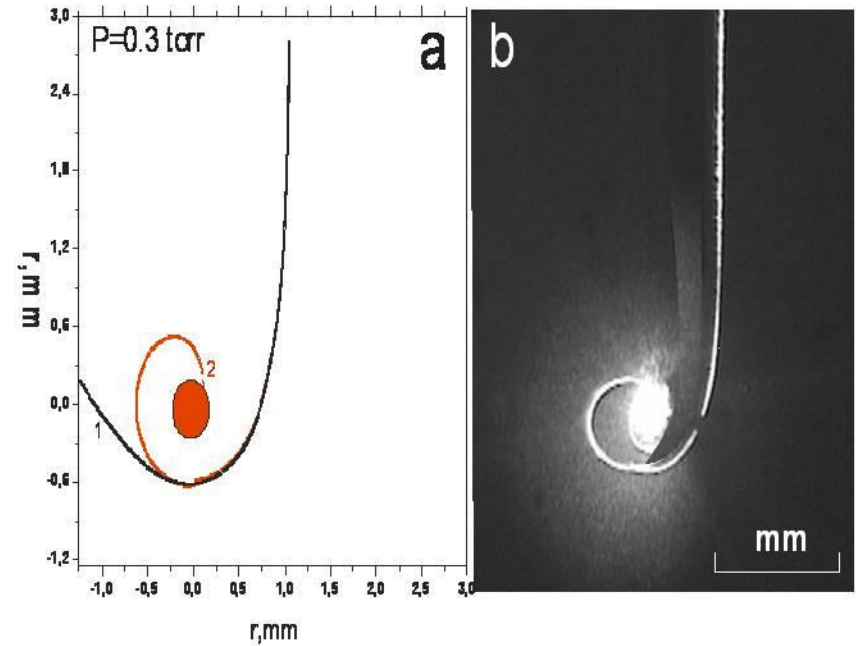
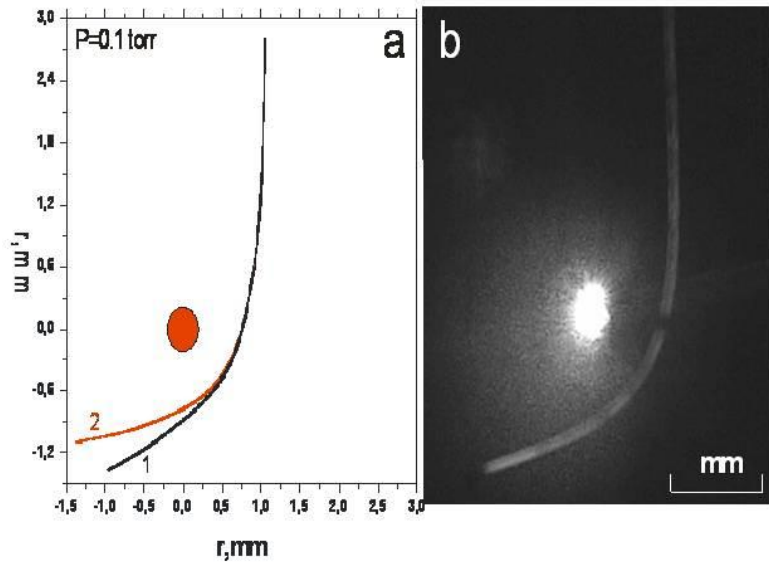
## Распределение потенциала вблизи цилиндрического зонда



## Распределение концентрации электронов и ионов вблизи цилиндрического зонда



## Сравнение результатов численного моделирования с экспериментальными данными



- 1) без учета силы ионного увлечения и сил торможения нейтралами
- 2) с учетом силы ионного увлечения и сил торможения нейтралами

Метод определения заряда пылевой частицы на основе  
эспериментальных траекторий движения

$$\frac{d^2r}{dt^2} = -\frac{eZ_d(r)}{M_d} \frac{dU(r)}{dr} + \frac{2K_0\rho^2}{M_d r^3}, \quad \frac{d\theta}{dt} = \frac{\rho}{r^2} \left( \frac{2K_0}{M_d} \right)^{1/2}.$$

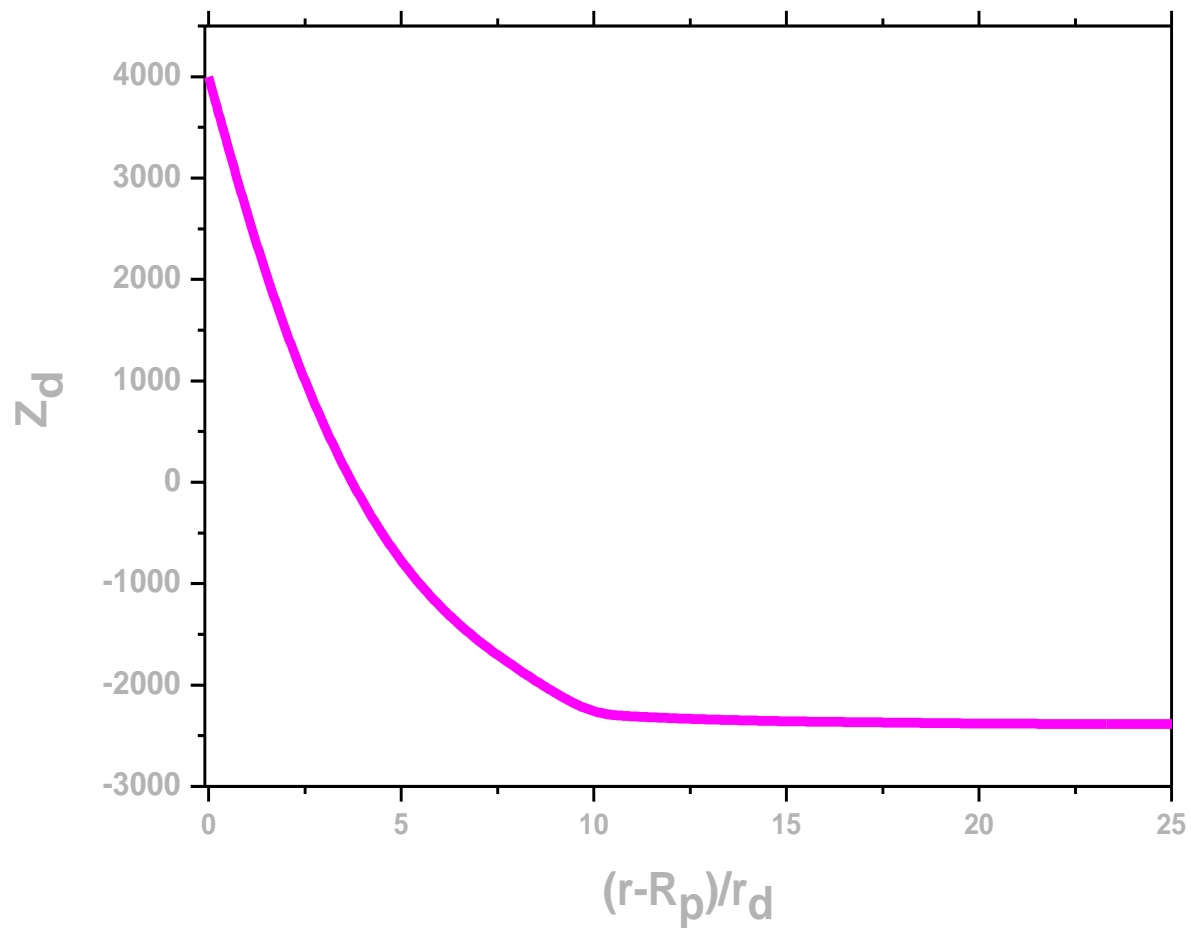
$$Z_d(r) = M_d \frac{r (d\theta/dt)^2 - (d^2r/dt^2)}{e dU/dr}$$

$$r(t = 0) = r_0$$

$$u_r(t = 0) = -\left[ 2K_0/M_d (1 - \rho^2/r_0^2) \right]^{1/2}$$

$$\theta(t = 0) = \arcsin(\rho/r_0)$$

## Зависимость заряда частицы от расстояния по отношению к зонду



## Выводы:

- Изучена динамика пылевых частиц вокруг зонда. Было выполнено определение траекторий отдельных частиц и визуальное наблюдение за слоем объемного заряда.
- Результаты показали, что с увеличением давления в разрядной трубке влияние зонда на траектории пылевых частиц увеличивается, наблюдаются большие углы отклонения пылевых частиц от начальных траекторий и вращение пылевых частиц вокруг зонда с последующим прилипанием на зонд
- Численные расчеты показали, что с ростом давления сила ионного увлечения влияет сильнее силы торможения нейтралами и увеличивает притяжение пылевых частиц к зонду. Численные и экспериментальные данные хорошо согласуются друг с другом.
- На основе траекторий пылевых частиц вокруг зонда был разработан новый метод определения заряда пылевой частицы.

**Спасибо за внимание !!!**

