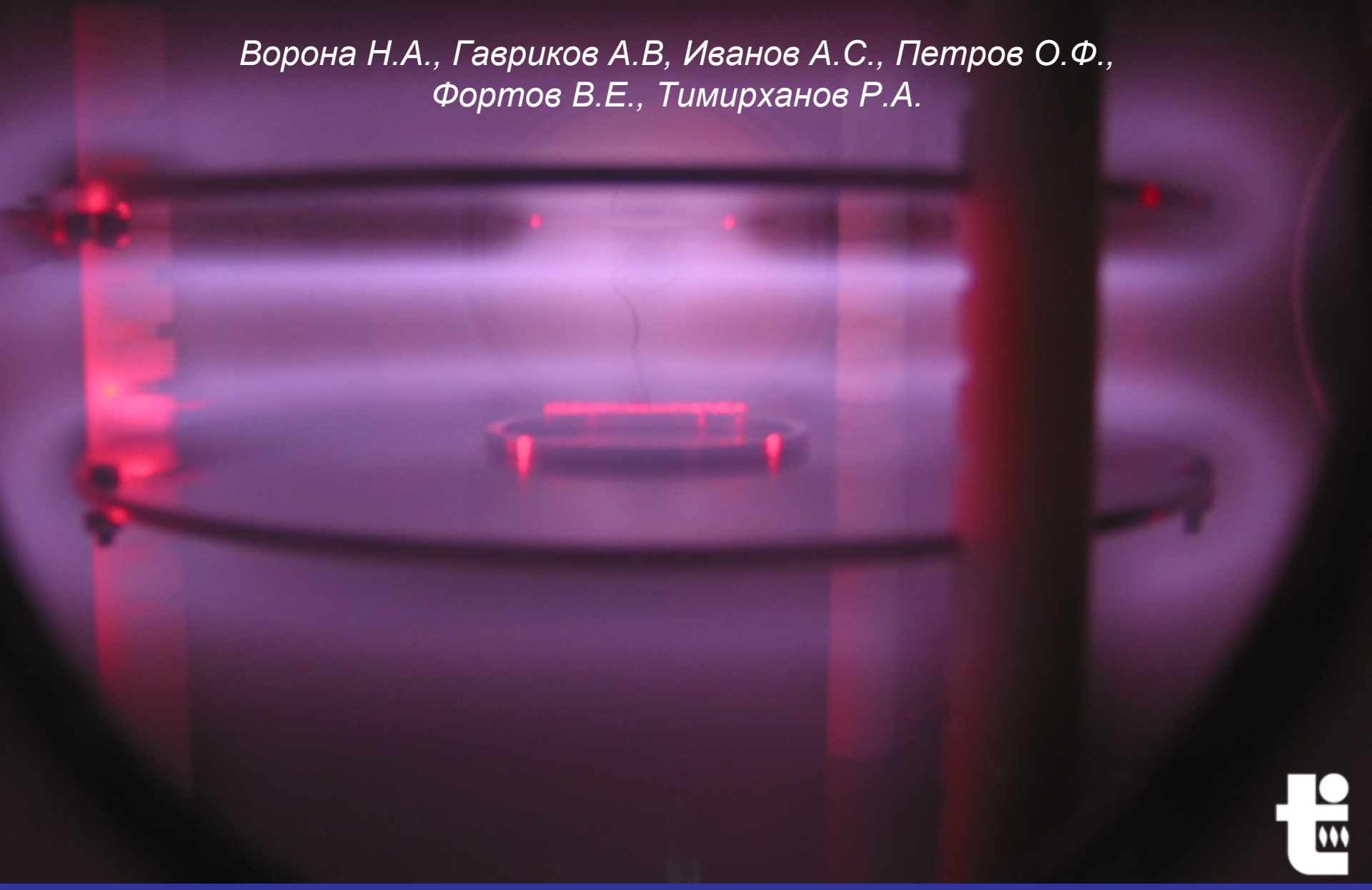
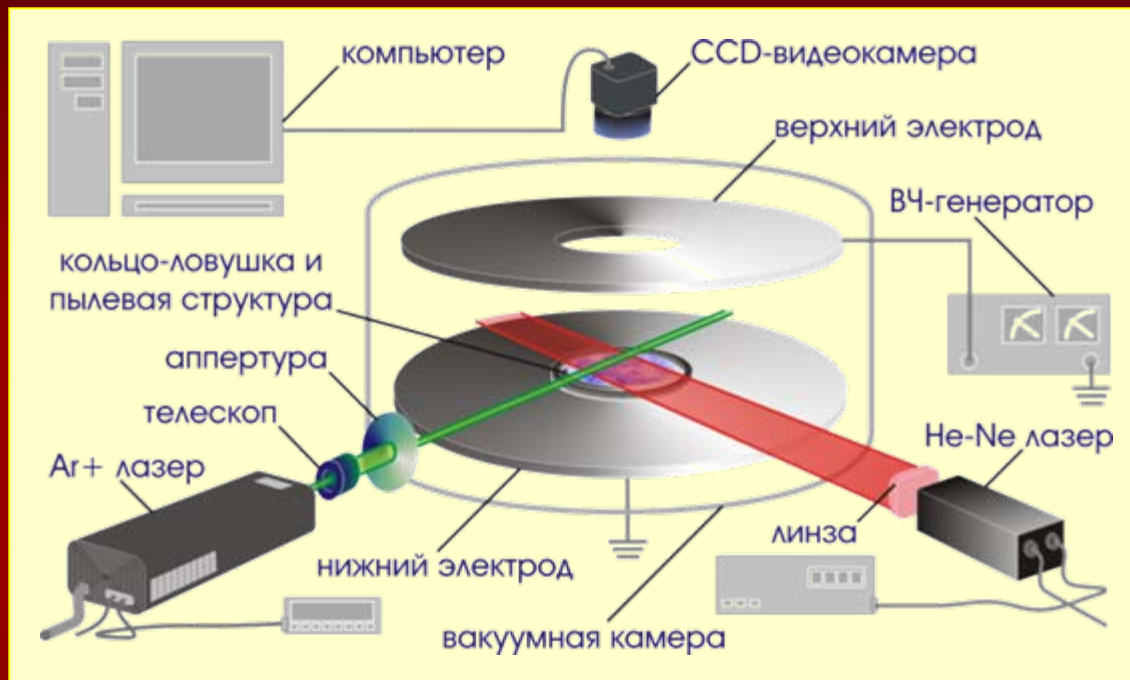


ИССЛЕДОВАНИЕ ВЯЗКОСТИ ПЛАЗМЕННО-ПЫЛЕВЫХ СТРУКТУР РАЗЛИЧНОЙ СТЕПЕНИ УПОРЯДОЧЕННОСТИ

*Ворона Н.А., Гавриков А.В, Иванов А.С., Петров О.Ф.,
Фортос В.Е., Тимирханов Р.А.*



Экспериментальная методика и параметры эксперимента



мощность излучения Ar⁺ лазера – 0 - 360 мВ

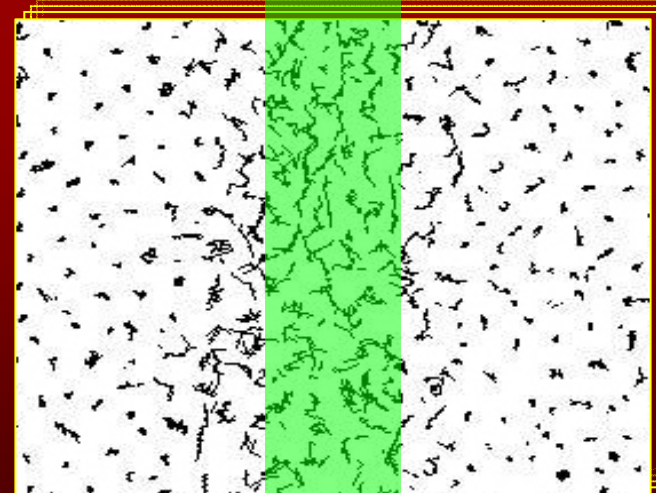
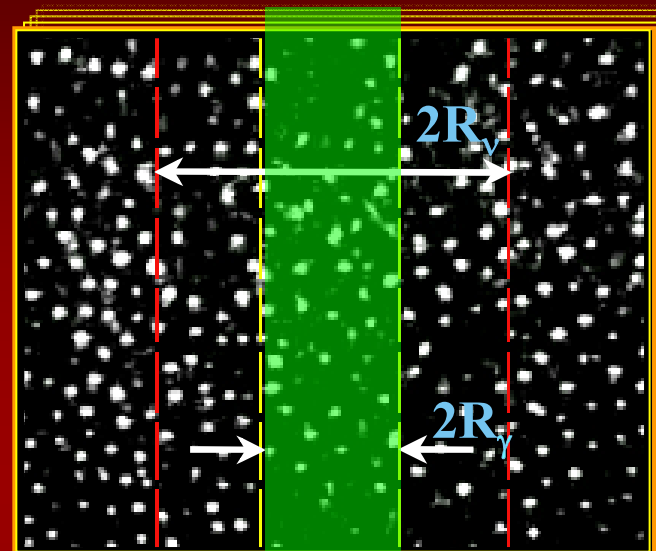
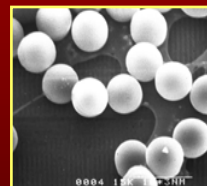
давление в системе – 35 Па

частицы МФ – 1,9 мкм

плотность структуры – $1,6 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$

характерный размер канала течения – $2R_v = 7 \text{ мм}$

ширина области действия лазерного излучения – $2R_\gamma = 3 \text{ мм}$

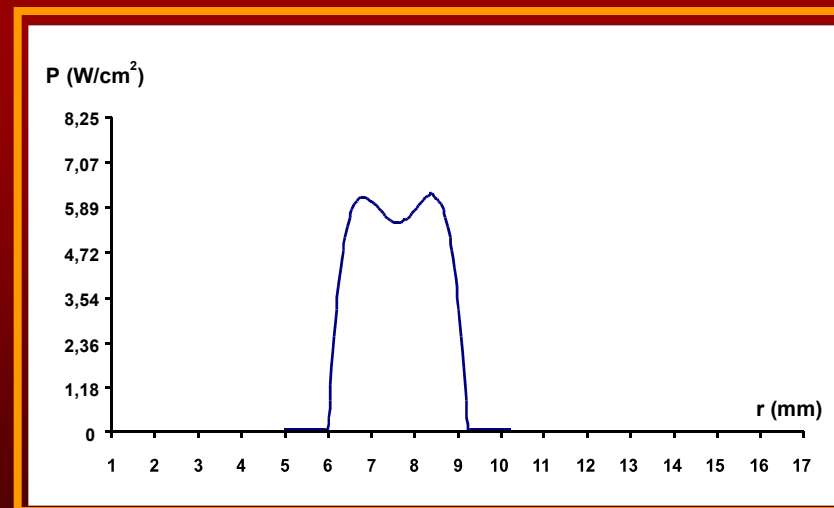
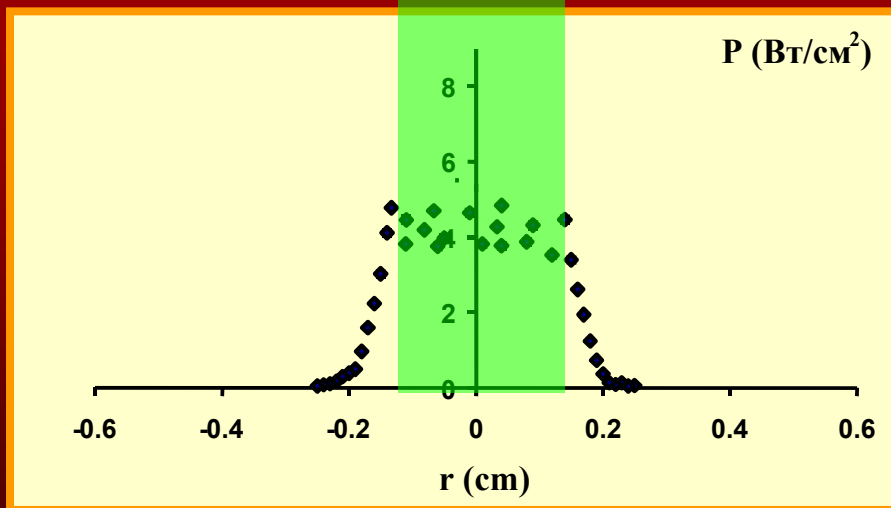
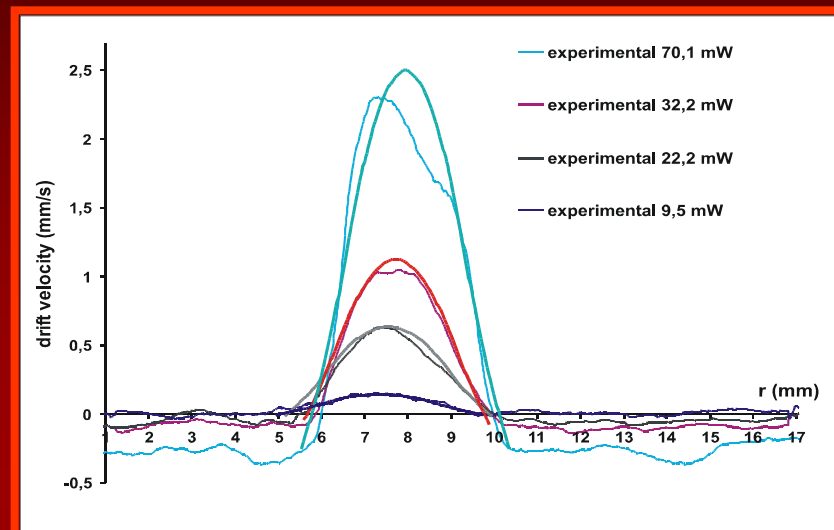
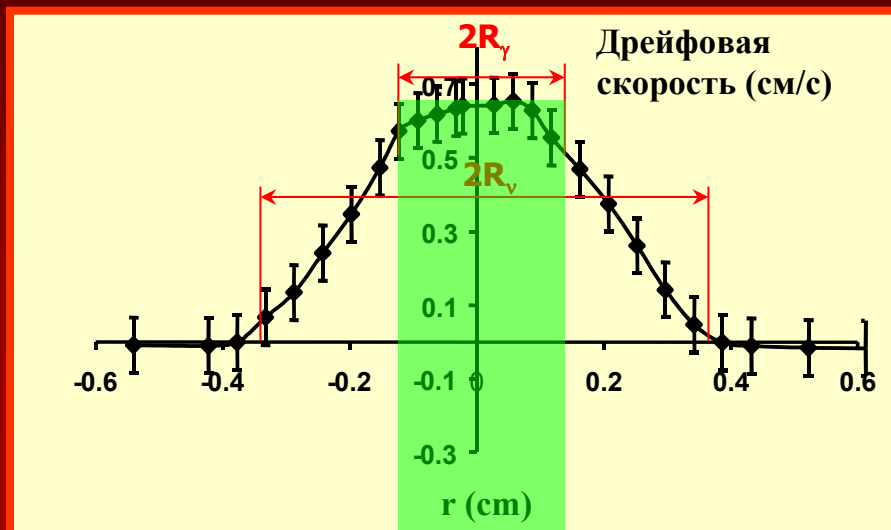


Ar⁺ лазер

ПОТОК



Распределение дрейфовой скорости макрочастиц и распределения мощности лазерного излучения



Параметры невозмущенной структуры: параметр неидеальности $\Gamma \sim 35$;
 концентрация $n_d = 1.6 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$; кинетическая температура $T = 0.05 \text{ эВ}$

r – радиус макрочастицы

η_g – вязкость буферного газа (аргон)

l_g – длина свободного пробега молекулы аргона

V_d – скорость макрочастиц

P_γ^* – эффективное давление

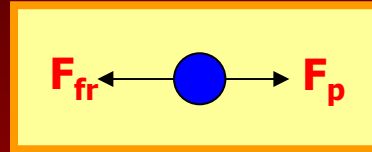
P_γ – давление лазерного излучения

c – скорость света

θ – коэффициент отражения света

A – численный коэффициент, связанный с характером

отражения атомов газа от поверхности частицы $A \in (1.09; 1.58)$



$$F_p = \pi r^2 \cdot P_\gamma^*$$

$$F_{fr} = F_p$$

$$P_\gamma^* = 6 \cdot \eta_g \cdot V_d / (A \cdot l_g)$$

$$P_\gamma = W(1 + \theta) / Sc$$

$$S = \pi R_\gamma^2$$

$$P_\gamma = 0.34 \cdot 10^{-3} \text{ Pa}$$

$$P_\gamma^* = 1.7 \cdot 10^{-3} \text{ Pa}$$

$$2R_v = 7 \text{ мм}$$

$$l_g = 0,3 \text{ мм}$$

$$2R_v \gg l_g \quad \Delta p_{in} = \pi r^2 P_\gamma^* L \pi R_\gamma^2 n_d \Delta t \quad \Delta p_{out} = 2\pi R_v L \eta_g \Delta t V_g / \Delta x \quad \Delta p_{in} = \Delta p_{out}$$

L – длина газовой «трубки»

V_g – скорость газовой компоненты

n_d – число макрочастиц в единице объема

$V_g / \Delta x$ – градиент скорости струи газа на поверхности цилиндра радиуса R_γ ($\Delta x = R_\gamma - R_g$)

Δp_{in} – импульс, поступающий в трубку за время Δt

Δp_{out} – импульс, теряемый через боковую поверхность за время Δt

$$A = 1.58;$$

$$R_\gamma = 1.5 \text{ мм};$$

$$n_d = 1.6 \cdot 10^9 \text{ м}^{-3};$$

$$2r = 1.9 \cdot 10^{-6} \text{ м}$$

$$\frac{V_g}{V_d} = \frac{3\pi r^2 R_\gamma^2 n_d}{A l_g} \left(1 - \frac{R_\gamma}{R_v} \right)$$

$$V_g / V_d \approx 1.5 \cdot 10^{-4}$$

Условие стационарности потока :

$$\eta^* V_d + \eta_g V_g = (1/2) \pi r^2 R_\gamma (R_v - R_\gamma) n_d P_\gamma^*$$

$$\frac{\eta^*}{\eta_g} = \frac{V_g}{V_d} \left(\frac{R_v}{R_\gamma} - 1 \right)$$

$$\frac{\eta^*}{\eta_g} = 0.5 \cdot 10^{-4}$$

$$\eta^* \approx 1.1 \cdot 10^{-9} \text{ Па} \cdot \text{с}$$

$$\eta_g \approx 22.7 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}$$

$$\eta^* \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial V}{\partial r} \right) = -F(r)$$

η_g – вязкость буферного газа (аргон)

η^* – коэффициент сдвиговой вязкости плазменно-пылевой жидкости

V – скорость плазменно-пылевой жидкости

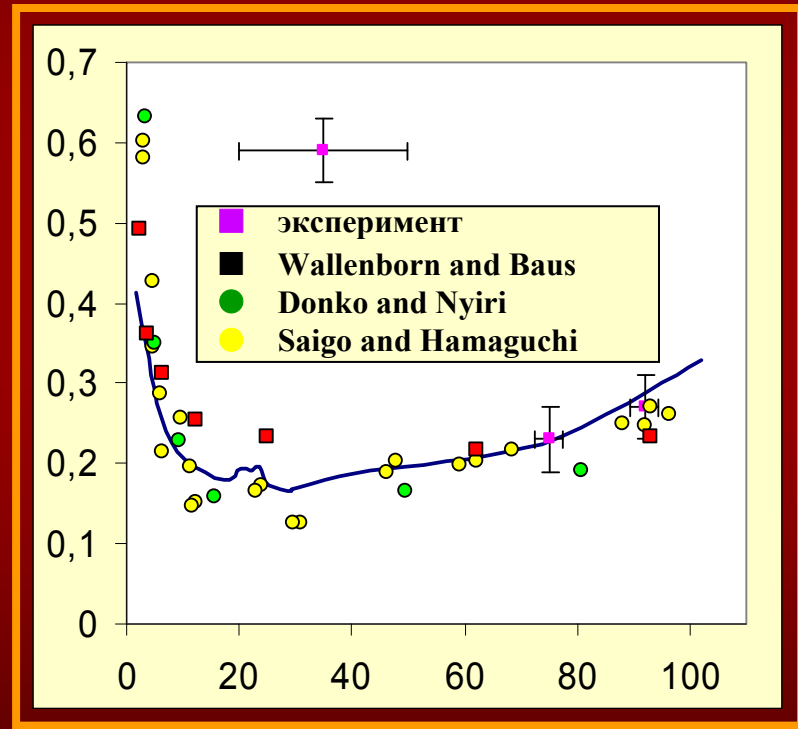
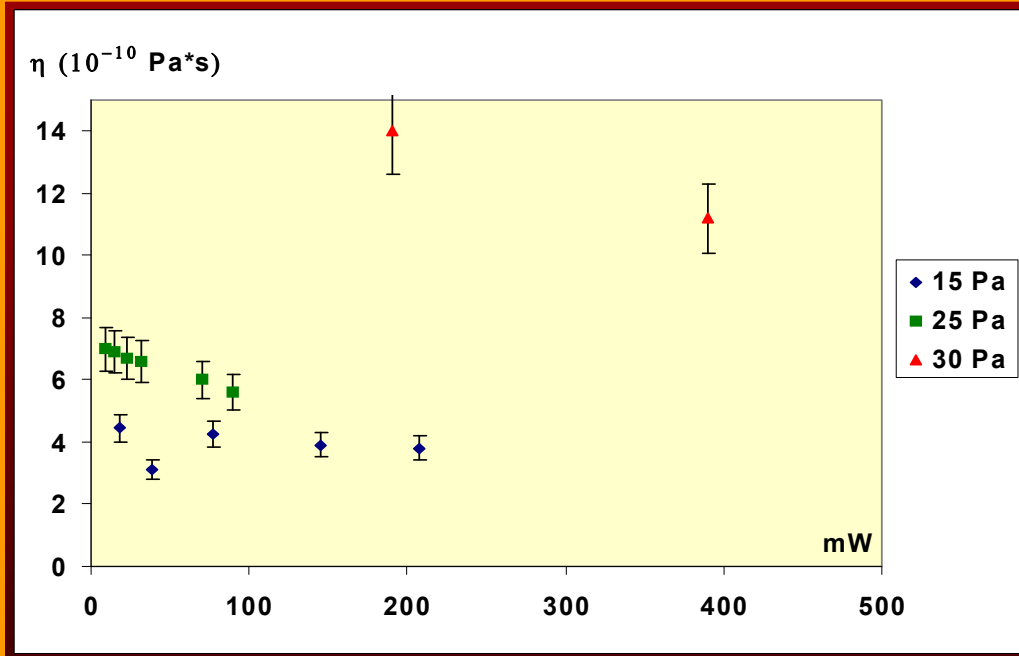
P – давление плазменно-пылевой жидкости

r – радиус вектор в цилиндрической системе координат

$F(r)$ – распределение объемной силы вдоль радиуса

Зависимость коэффициента сдвиговой вязкости от эффективного параметра неидеальности

Зависимость коэффициента сдвиговой вязкости плазменно-пылевой жидкости от величины силы внешнего воздействия для различных давлений



Число Рейнольдса:

$$Re = 2R_v V_d / v^* = 0.02 \div 0.3$$

$$v^* = h^* / m_d n_d = 0.46 \div 1.3 \text{ см}^2/\text{с}$$

Вода: $0.82 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2/\text{с}$

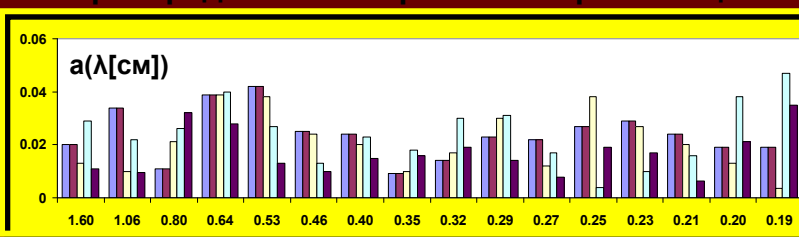
Результаты



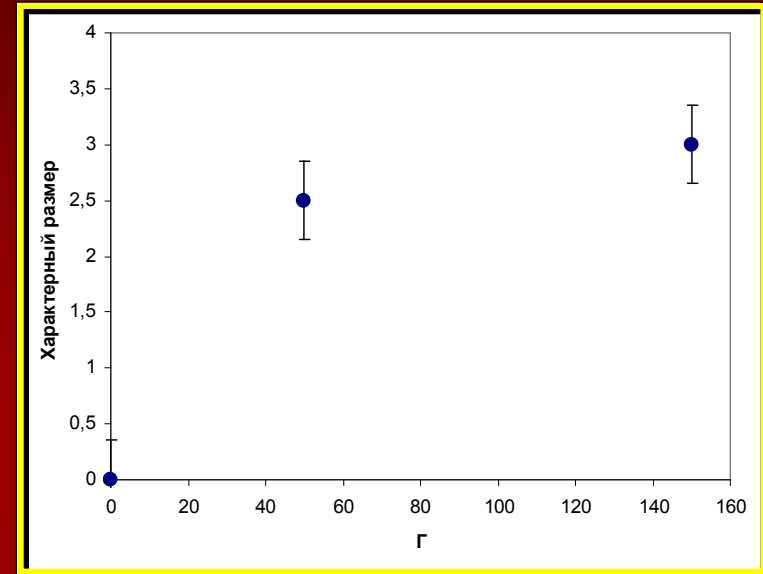
Обработка и анализ результатов



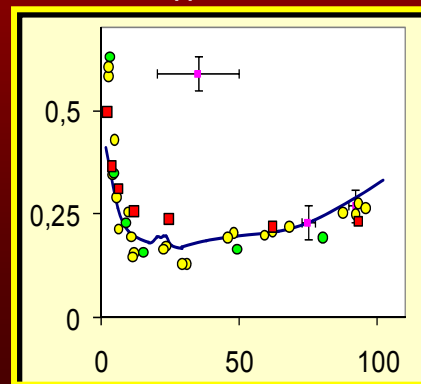
Пространственный Фурье-спектр распределения скоростей макрочастиц



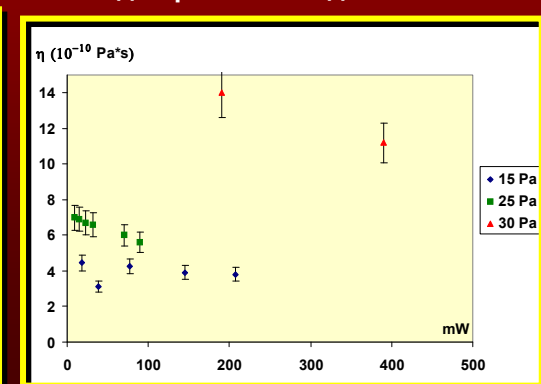
Зависимость размера кластера от эффективного параметра неидеальности



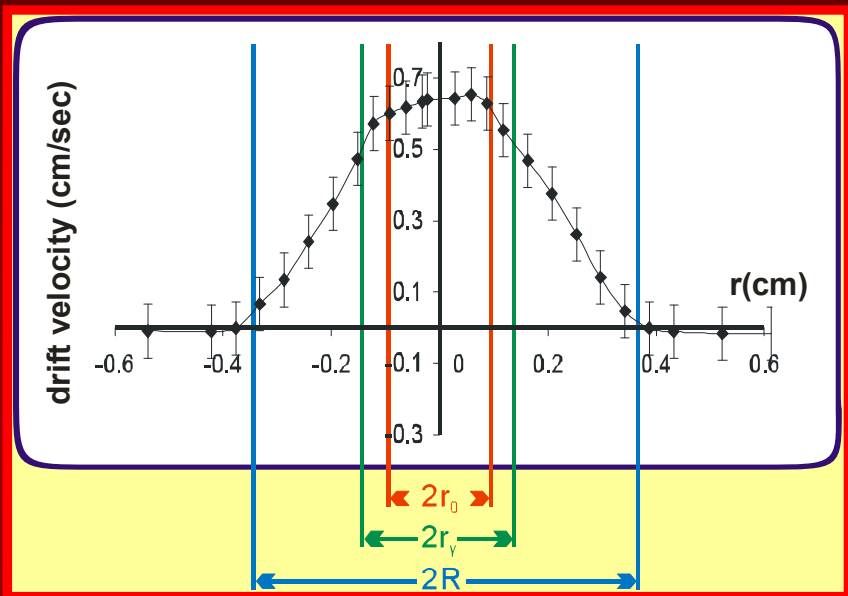
Зависимость коэффициента сдвиговой вязкости от эффективного параметра неидеальности



Зависимость коэффициента сдвиговой вязкости плазменно-пылевой жидкости от величины силы внешнего воздействия для различных давлений



Типичное неньютоновское распределение скоростей в канале течения



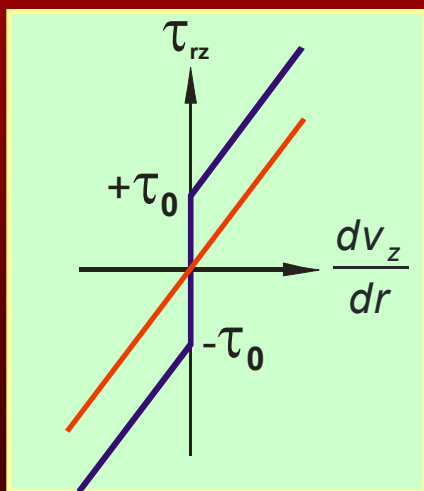
Модель Бингама неньютоновской жидкости

$$\tau_{rz} = -\mu_0 \frac{dV}{dr} - \tau_0 \quad , \quad |\tau| > \tau_0$$

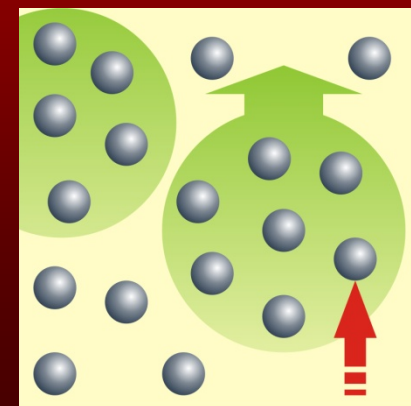
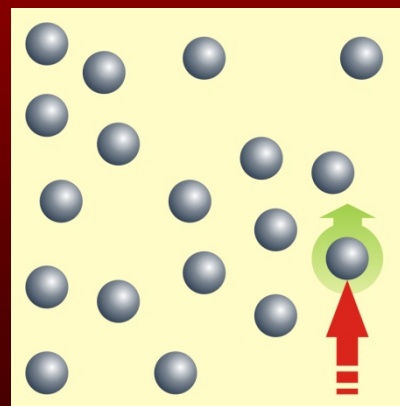
$$\frac{dV}{dr} = 0 \quad , \quad |\tau| < \tau_0$$

τ_{rz} – сдвиговая часть тензора напряжений
 μ_0 – коэффициент сдвиговой вязкости
 τ_0 – пороговое сдвиговое напряжение

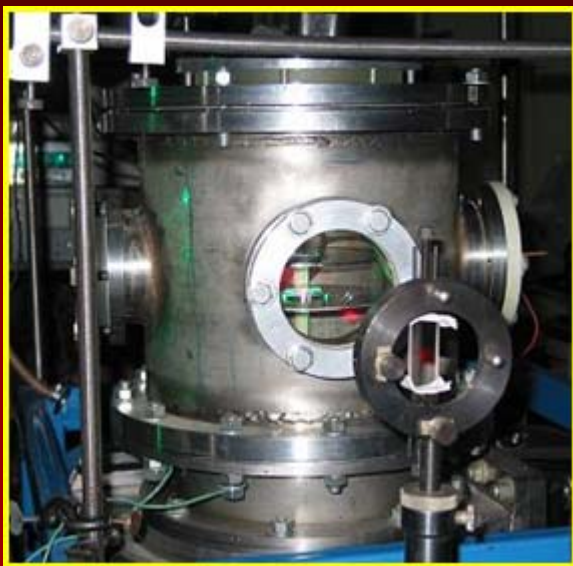
r_0 – область поршневого течения
 r_γ – область действия объемной силы
 R – радиус канала течения



— модель Бингама
 — Ньютонова модель



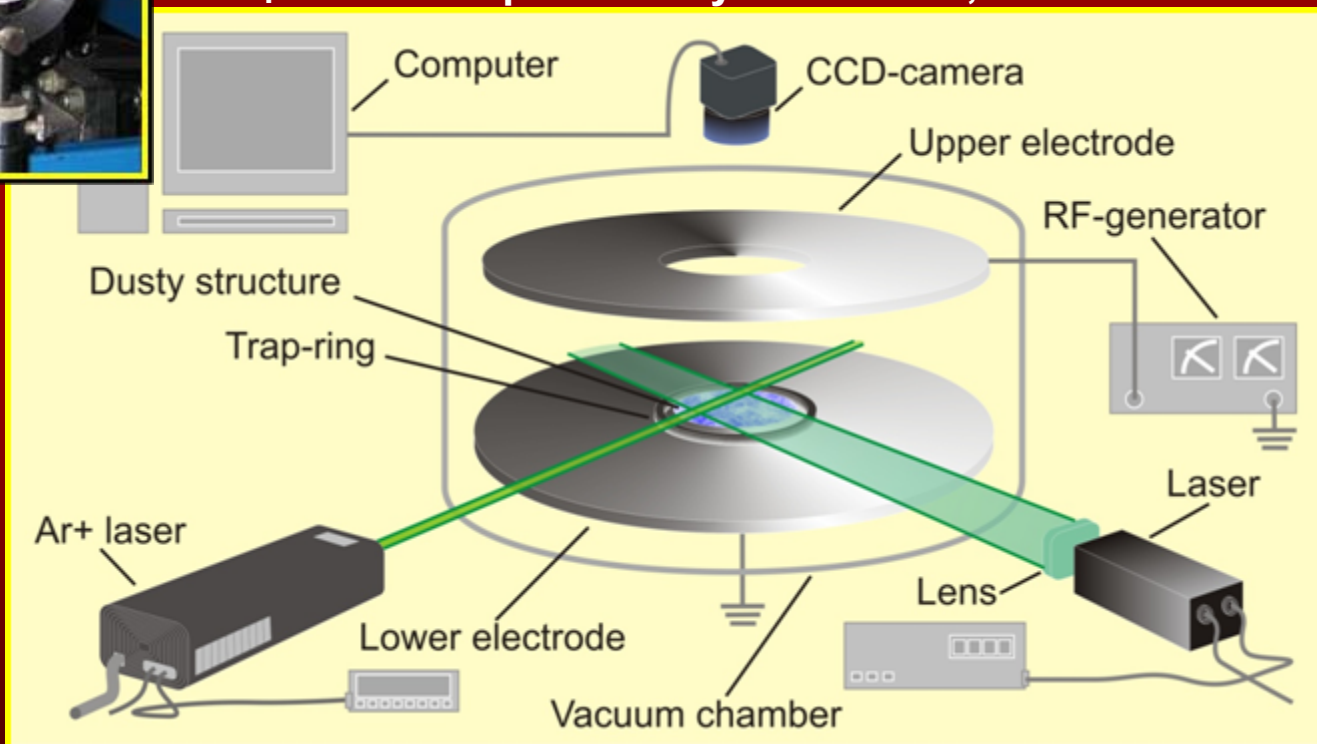
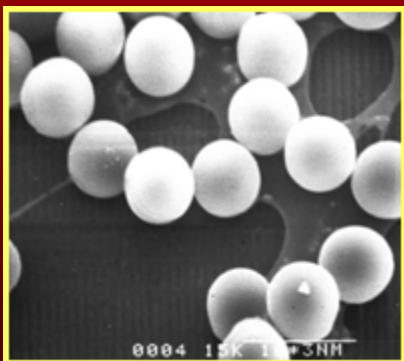
Эксперимент



Мощность разряда	5 Вт	5 Вт
Давление	0,14-0,16 торр	0,44-0,46 торр
Скорость съемки	100 кадров/с	50 кадров/с
Размер частиц	12,74 мкм МФ	7,84 мкм МФ
Масса частиц	1,6 нг	0,4 нг

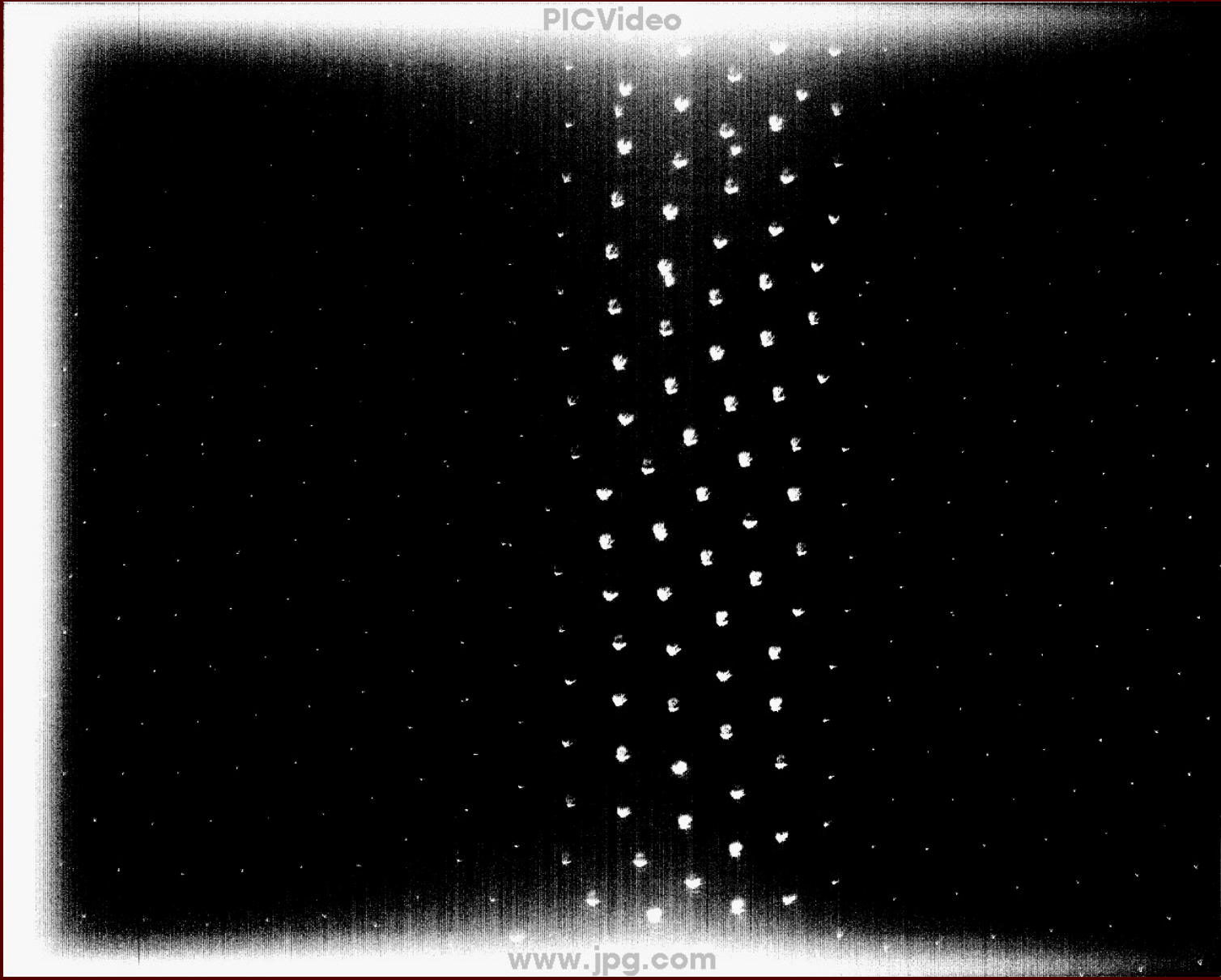
Буферный газ- аргон
Мощность лазерного излучения 0 – 2,5 Вт

МФ частицы, 4 мкм



Фото, схема установки и параметры эксперимента

PICVideo

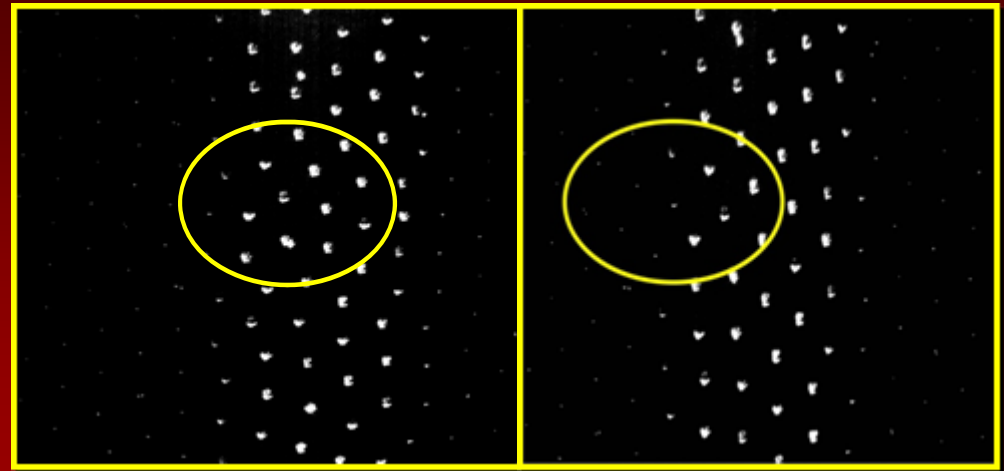
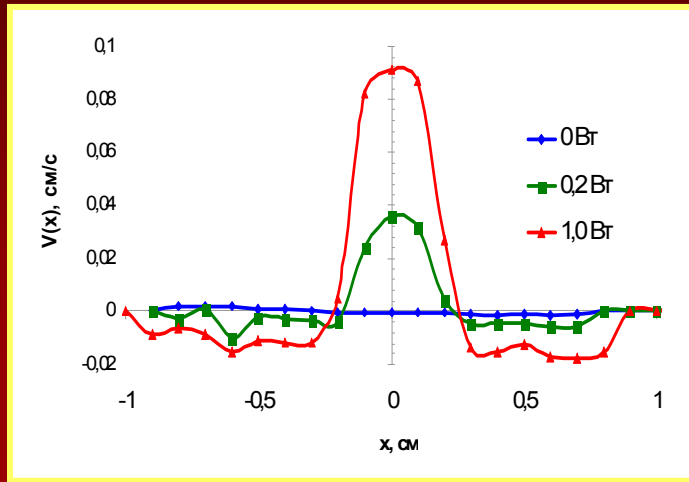


www.jpg.com

Результаты



Распределение скоростей частиц
в канале течения



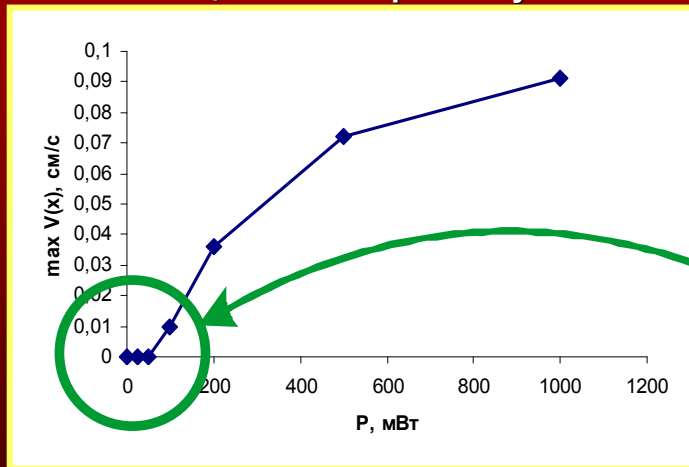
Дислокация
образовалась

Дислокации нет

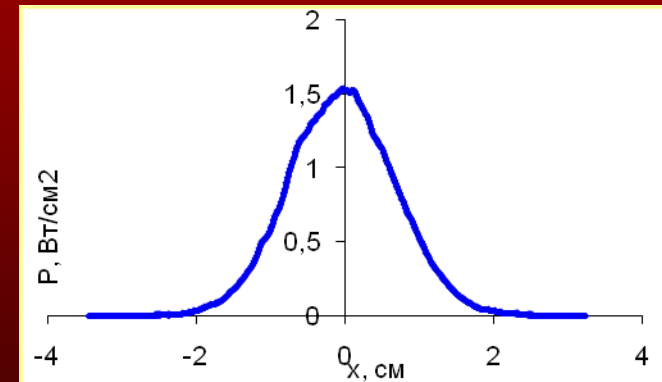
Зависимость максимальной скорости
пылевых частиц в канале течения от
мощности лазерного луча

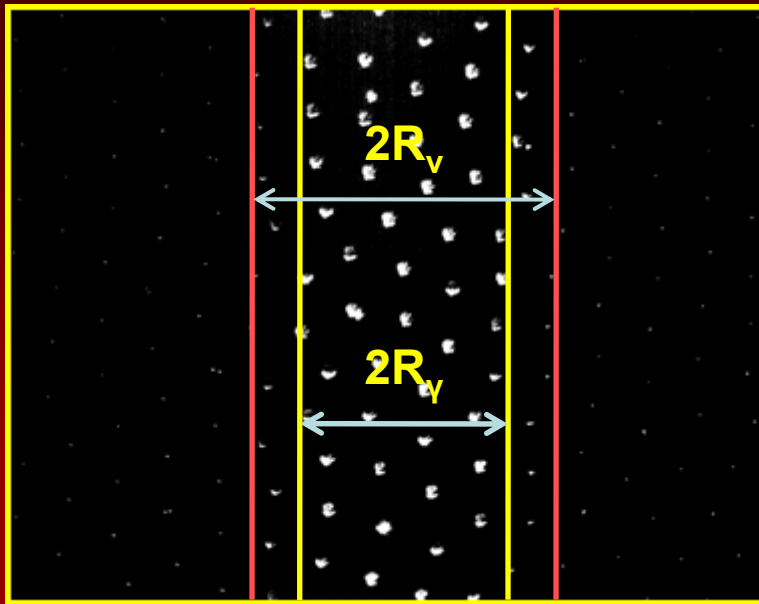
Лазерное воздействие – 0 - 1Вт
Ширина лазерного пучка – 4 мм
Ширина канала течения – 5 мм

Профиль
лазерного
пучка



Пороговая
мощность
50 мВт





$$2R_v = 6 \text{ мм}$$

$$l_g = 0,5 \text{ мм}$$

$$2R_v \gg l_g$$

$$\Delta p_{in} = \pi r^2 P_\gamma^* L \pi R_\gamma^2 n_d \Delta t$$

$$\Delta p_{out} = 2\pi R_v L \eta_g \Delta t V_g / \Delta x$$

$$\Delta p_{in} = \Delta p_{out}$$

$$\eta^* V_d + \eta_g V_g = (1/2) \pi r^2 R_\gamma (R_v - R_\gamma) n_d P_\gamma^*$$

L – длина газовой трубки

V_g – скорость газа

n_d – концентрация пыли

$V_g / \Delta x$ – градиент скорости газа на поверхности цилиндра радиуса R_v ($\Delta x = R_v - R_\gamma$)

Δp_{in} – импульс поступающий в трубку за время Δt за счет эффективного давления

Δp_{out} – поток импульса через боковую поверхность цилиндра длиной L

$$\frac{V_g}{V_d} = \frac{3\pi r^2 R_\gamma^2 n_d}{A l_g} \left(1 - \frac{R_\gamma}{R_v}\right)$$

$$V_g / V_d \approx 5,9 \cdot 10^{-4}$$

$$\frac{\eta^*}{\eta_g} = \frac{V_g}{V_d} \left(\frac{R_v}{R_\gamma} - 1 \right) \eta_{жс}^* \approx 1,1 \cdot 10^{-9} \text{ Па} \cdot \text{с}$$

$$\eta_{k1}^* \approx 6,6 \cdot 10^{-9} \text{ Па} \cdot \text{с}$$

$$\eta_{k2}^* \approx 3,9 \cdot 10^{-8} \text{ Па} \cdot \text{с}$$

$$A = 1.58; \quad R_v = 3 \text{ мм}; \quad R_\gamma = 2 \text{ мм}; \quad n_d = 10^9 \text{ м}^{-3}; \quad 2r = 12,74 \cdot 10^{-6} \text{ м}; \quad l_g = 0,5 \text{ мм}$$

$$A = 1.58; \quad R_v = 4 \text{ мм}; \quad R_\gamma = 4,5 \text{ мм}; \quad n_d = 8 \cdot 10^9 \text{ м}^{-3}; \quad 2r = 7,84 \cdot 10^{-6} \text{ м}; \quad l_g = 0,1 \text{ мм}$$

Заключение

Экспериментально исследованы течения в плазменно-пылевых структурах. Получены значения коэффициента сдвиговой вязкости для структур различной упорядоченности. Отмечен неньютонов характер течения плазменно-пылевой жидкости.

SCIENCE
Nazar Vorona



СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ