



Х Всероссийский съезд  
по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики  
24 – 30 августа 2011, Нижний Новгород

# Аэродинамическая фокусировка частиц в потоках с ударными волнами

О.Д. Рыбдылова, И.В. Голубкина  
*Научно исследовательский институт механики  
МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва*



# План

- Введение
- Математическая модель
  - Модель запыленного газа
  - Полный лагранжев подход
- Фокусировка инерционных частиц за точкой взаимодействия плоских ударных волн
- Взаимодействие косого скачка уплотнения с головной ударной волной при обтекании цилиндра сверхзвуковым запыленным потоком
- Фокусировка частиц в канале за ударной волной
- Заключение



# МОТИВАЦИЯ



Каска с нанесенной с помощью технологии "direct-write" антенной (BAE systems)



Космическая транспортная система.

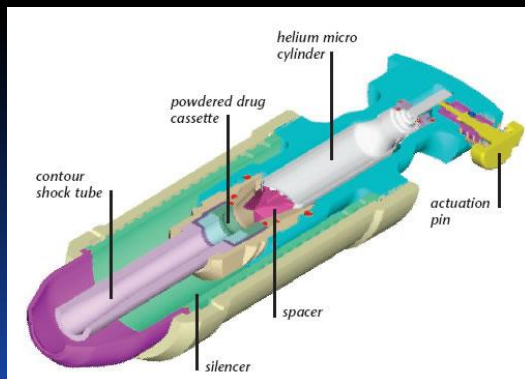


Схема системы ввода лекарственных средств. (Liu & Kendall, 2004)

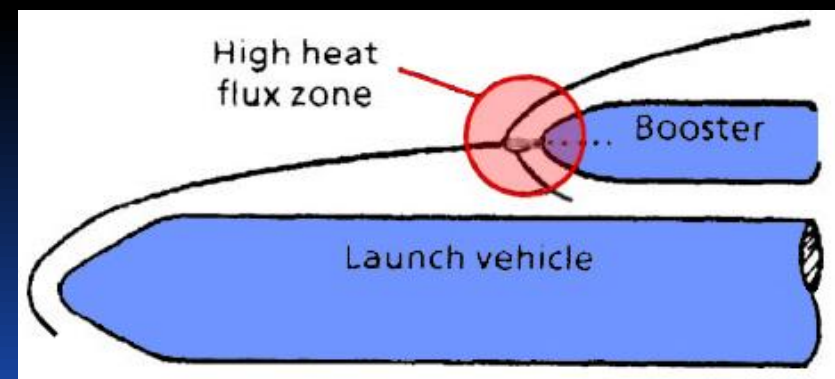


Схема течения. Взаимодействие ударных волн.



# Модель запыленного газа

- Несущая фаза – совершенный газ
- Включения – одинаковые сферические частицы радиуса  $\sigma$  и массы  $m$
- Объемная доля частиц пренебрежимо мала, частицы не взаимодействуют друг с другом

## Полный лагранжев метод

$$n_s |J| = n_{s0} |J_0| \quad \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial t} = \mathbf{v}_s \quad m \frac{\partial \mathbf{v}_s}{\partial t} = \mathbf{f}_s \quad c_s m \frac{\partial T_s}{\partial t} = q_s \quad \text{A.H. Осипцов, 2000}$$

Сила, действующая на частицу и межфазный поток тепла:

$$\vec{f}_s = 6\pi\sigma\mu(\mathbf{v} - \mathbf{v}_s) \cdot C_f(M_s, Re_s) + \text{sign}\left(\frac{\partial u}{\partial y}\right) 6.46\sigma^2 \sqrt{\mu\rho \left|\frac{\partial u}{\partial y}\right|} (u - u_s) \mathbf{j} C_{saf}(Re_s, Re_g)$$

$$q_s = 4\pi\sigma\lambda(T - T_s) \cdot C_q(M_s, Re_s, Pr)$$

$$M_s = \frac{|\mathbf{v} - \mathbf{v}_s|}{\sqrt{\gamma RT}}, \quad Re_s = \frac{2\sigma\rho|\mathbf{v} - \mathbf{v}_s|}{\mu}, \quad Re_g = \left|\frac{\partial u}{\partial y}\right| \frac{\sigma^2 \rho}{\mu}$$

$C_f, C_q$  - Carlson D.J., Hoglund R.F. "Particle drag and heat transfer in rocket nozzles", 1964

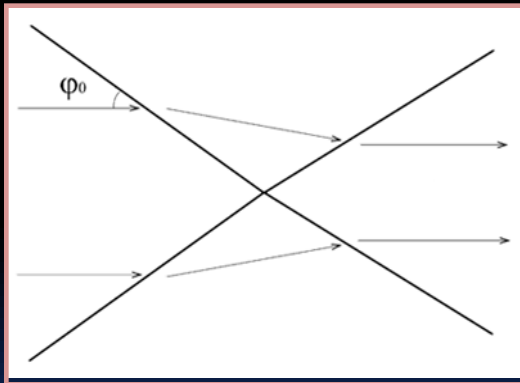
$C_{saf}$  - Mei R. "An approximate expression for the shear lift force at finite Reynolds number", 1992



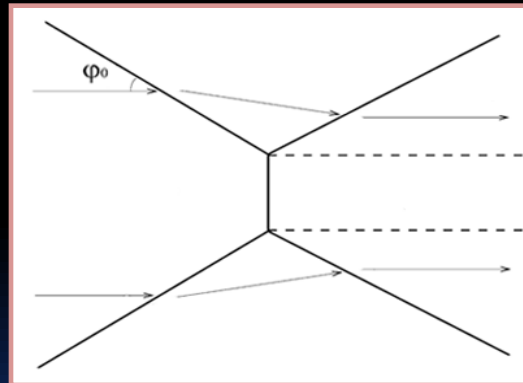
# Взаимодействие ударных волн в запыленном газе

## Режимы взаимодействия волн

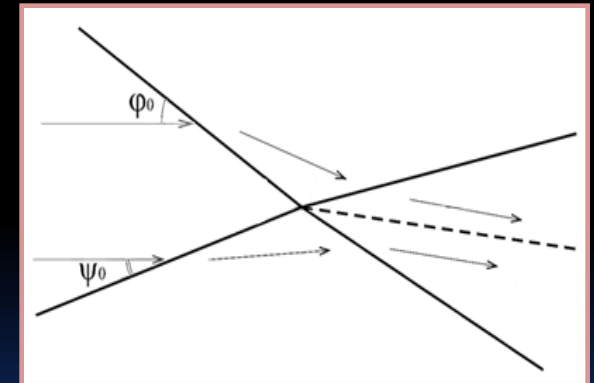
регулярное  
симметричное



маховское  
симметричное



регулярное  
несимметричное

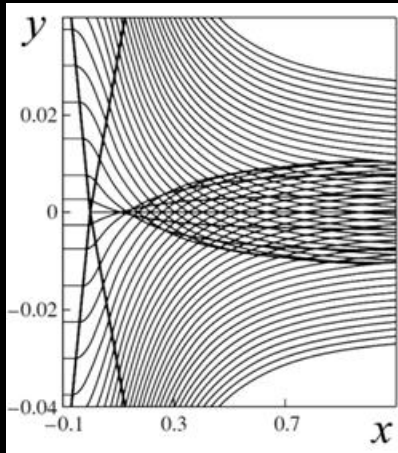


Параметры газа, постоянные в каждой области, вычисляются аналитически с использованием соотношений Рэнкина - Гюгонио на ударных волнах

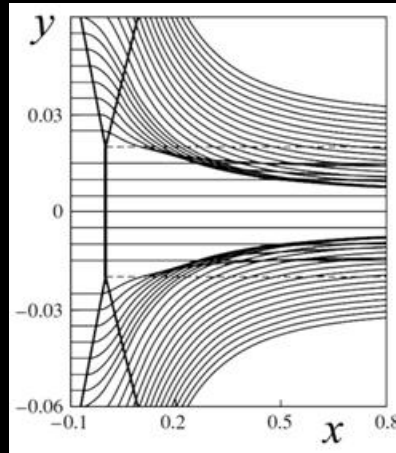


# Траектории и концентрация частиц

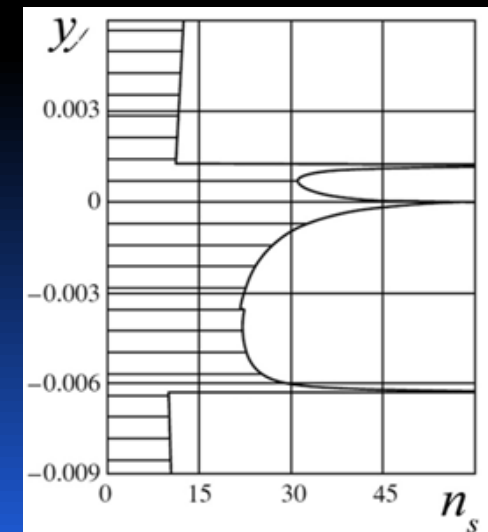
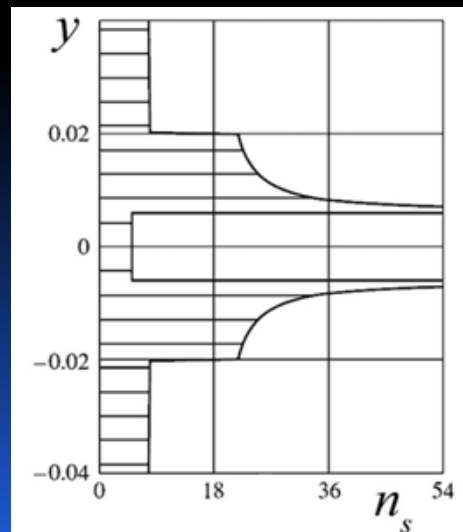
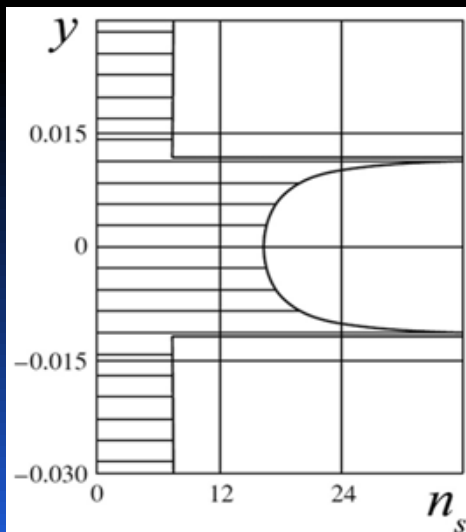
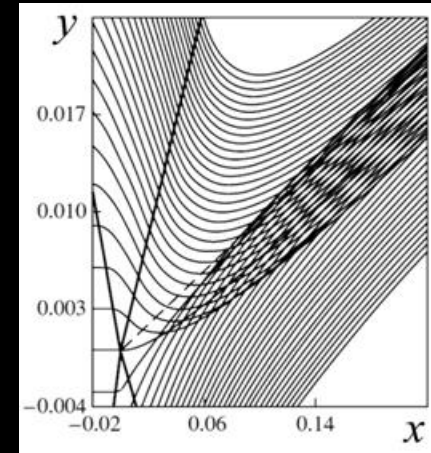
$M_0=5, Re_0=100, \varphi_0=30^\circ$



$M_0=5.39, Re_0=100, \varphi_0=30^\circ$

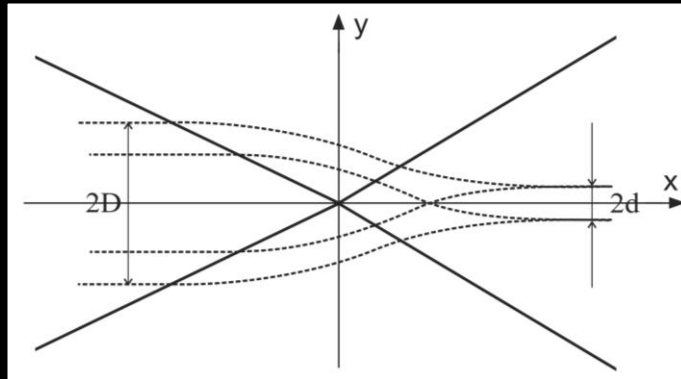


$M_0=8, Re_0=500, \varphi_0=30^\circ, \psi_0=40^\circ$





# Параметрическое исследование эффекта фокусировки частиц

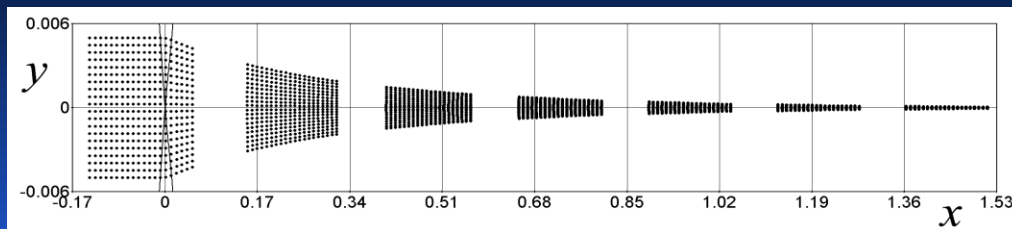


Параметры, характеризующие  
степень фокусировки частиц:

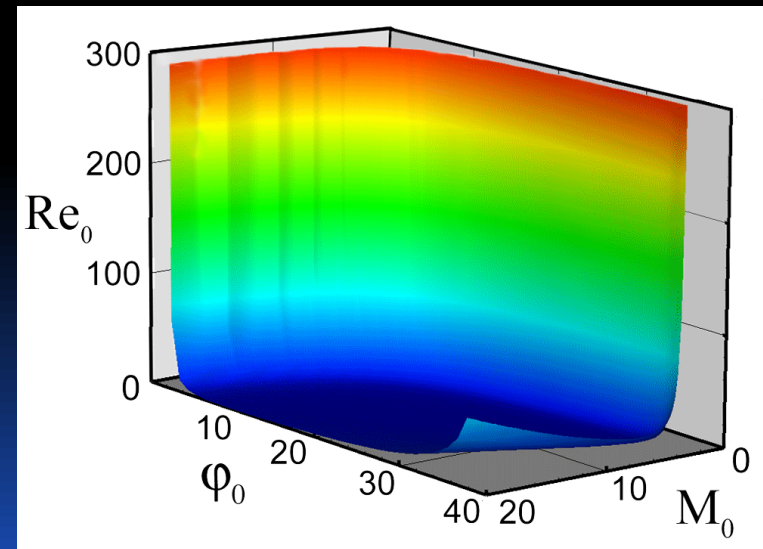
Определяющие параметры:

$$d, \delta = \frac{D}{d}$$

$$M_0, \varphi_0, \psi_0, Re_{s0}$$

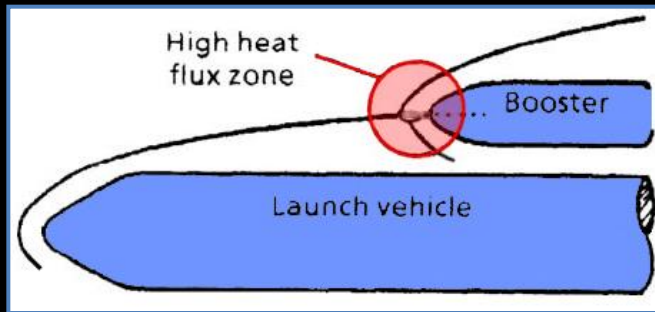


Поверхность в пространстве  
определяющих параметров,  
соответствующая режимам  
оптимальной фокусировки ( $\delta \rightarrow \infty$ ):

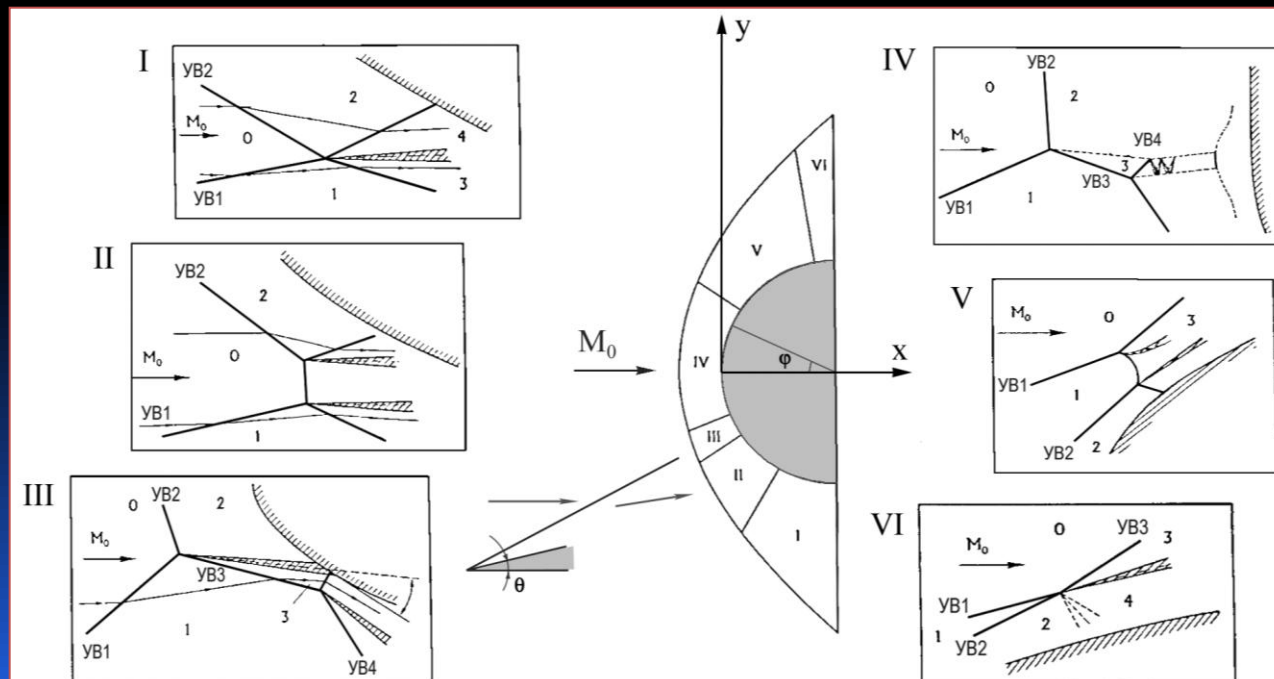




# Взаимодействие головной ударной волны с косым скачком уплотнения в запыленном газе



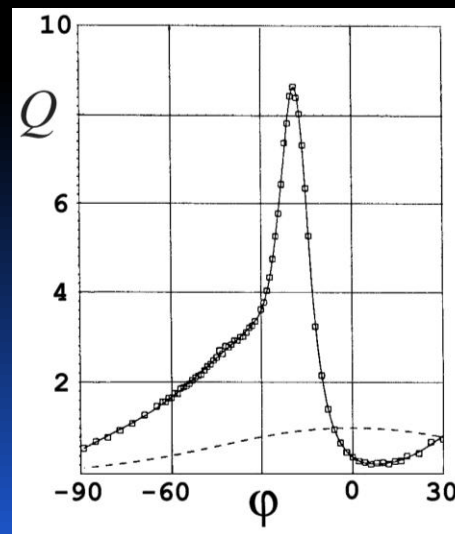
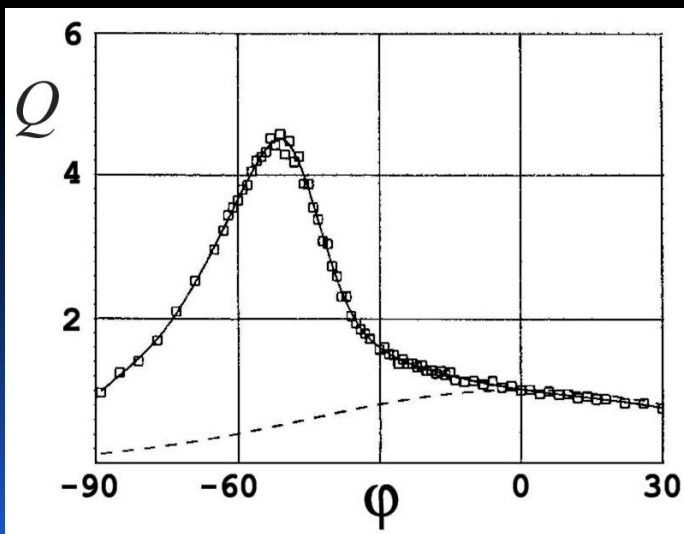
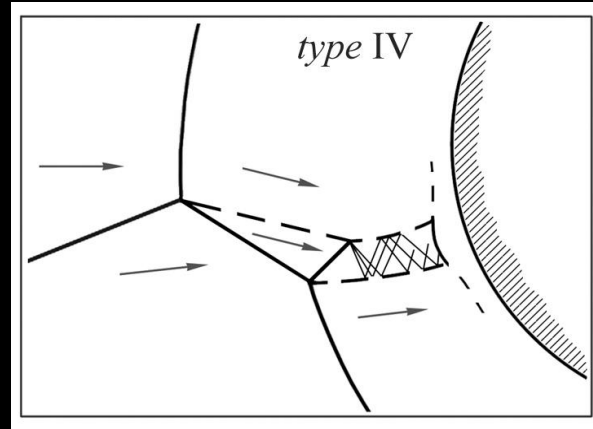
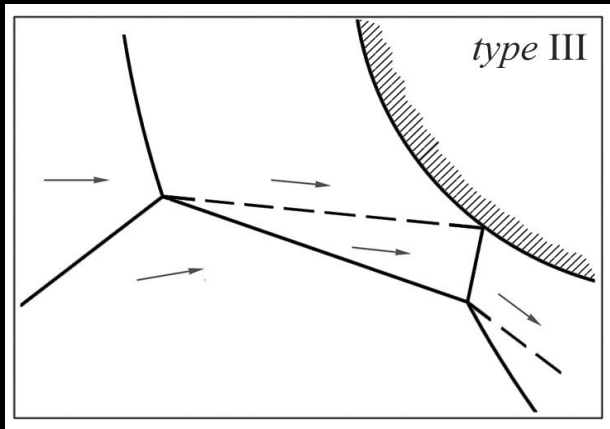
Типы  
взаимодействия  
ударных волн  
(В. Edney, 1968):







# III и IV типы взаимодействия ударных волн



*Borovoy V. Ya., Chinilov A. Yu., Gusev V. N., et al. "Interference between a cylindrical bow shock and a plane oblique shock" // AIAA J. 1997. V. 35.*



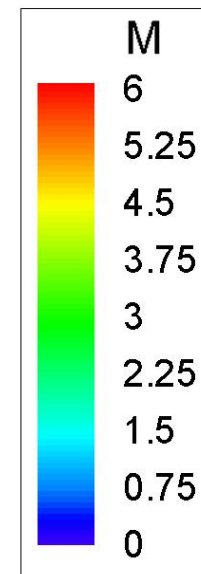
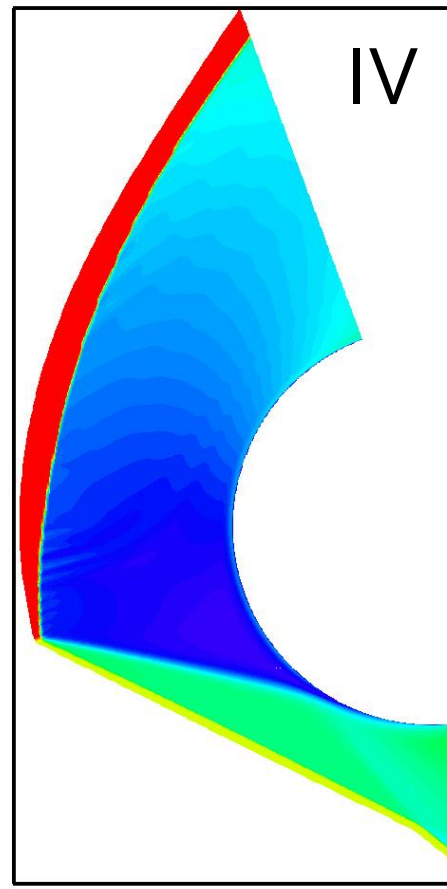
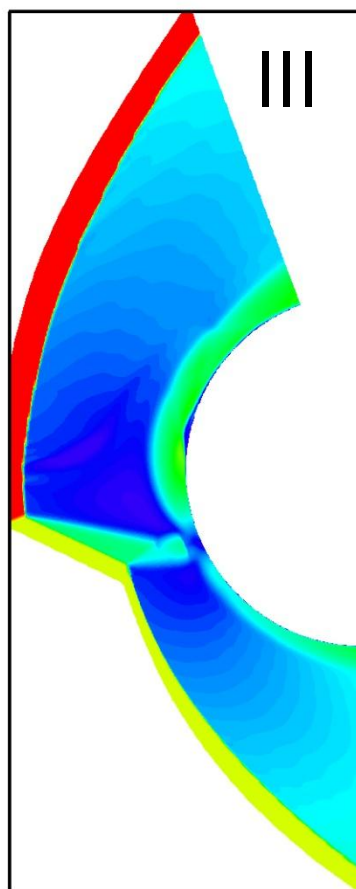
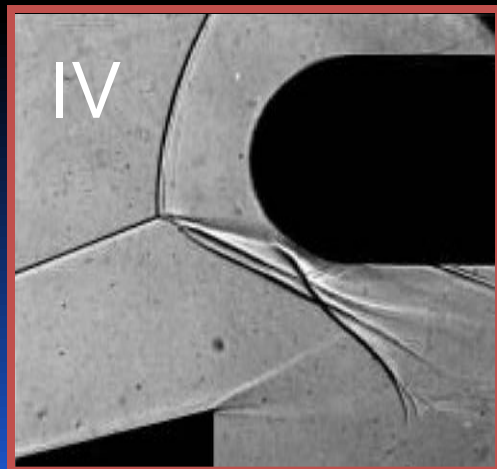
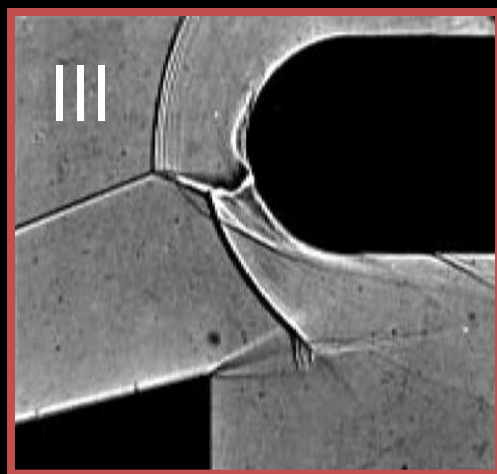
# Метод расчета параметров несущей фазы

*(Сахаров В.И., Громов В.Г., Фатеева Е.И.,  
отчет НИИ механики МГУ № 4507. 1998)*

- Для аппроксимации нестационарных уравнений Навье-Стокса используется метод контрольных объемов, применяется двухслойная неявная итерационная схема
- Сетка: многоблочная, неоднородная, сгущающаяся к поверхности тела, адаптированная к внешним ударным волнам
- Невязкие потоки через грани ячеек рассчитываются из точного решения задачи Римана, с применением стандартного TVD метода
- Вязкие потоки рассчитываются с использованием центральных разностей
- Обращение неявного оператора реализуется методом последовательной релаксации Гаусса-Зейделя вдоль линий с применением приближенной факторизации

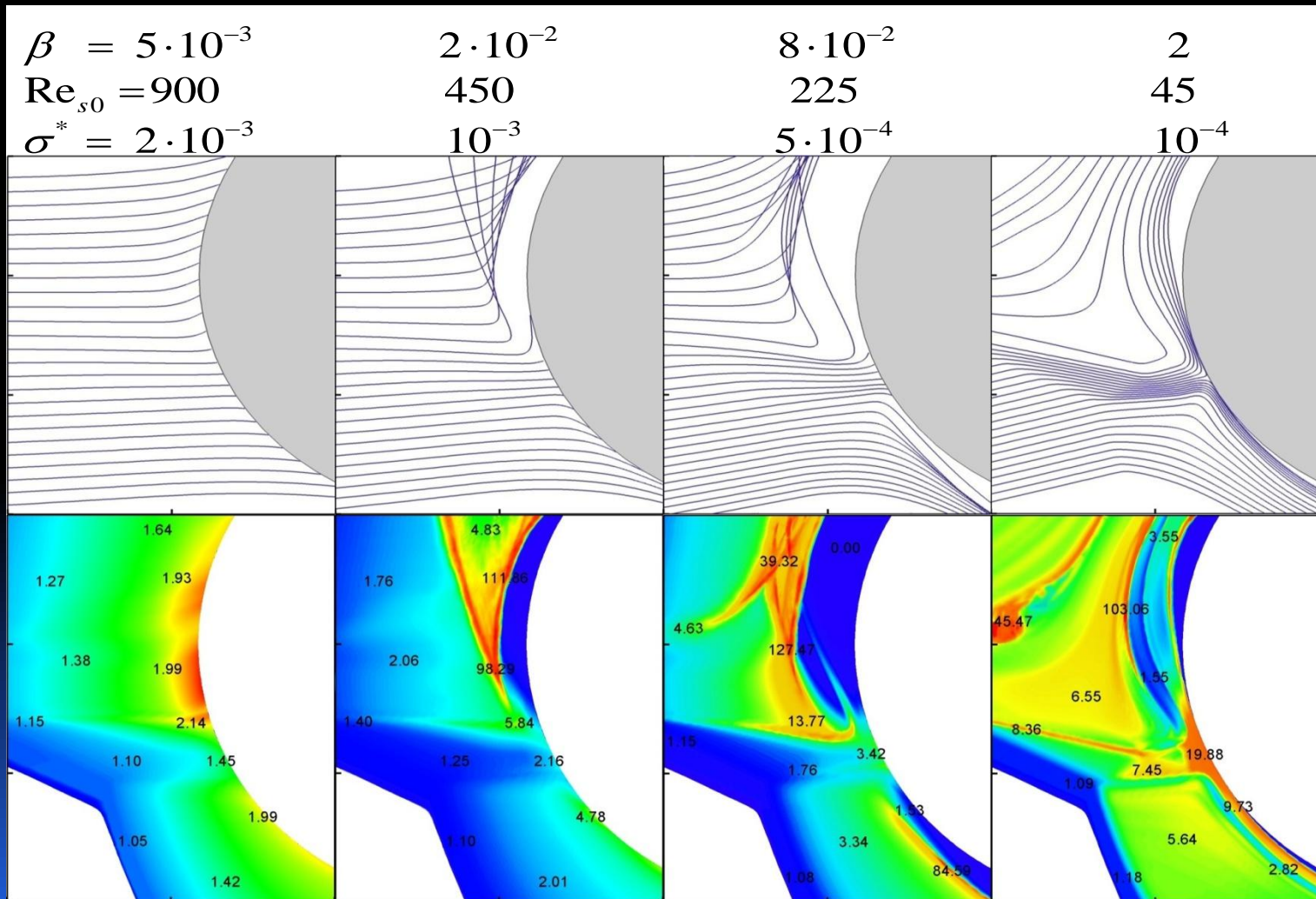


# Распределение значений числа Маха



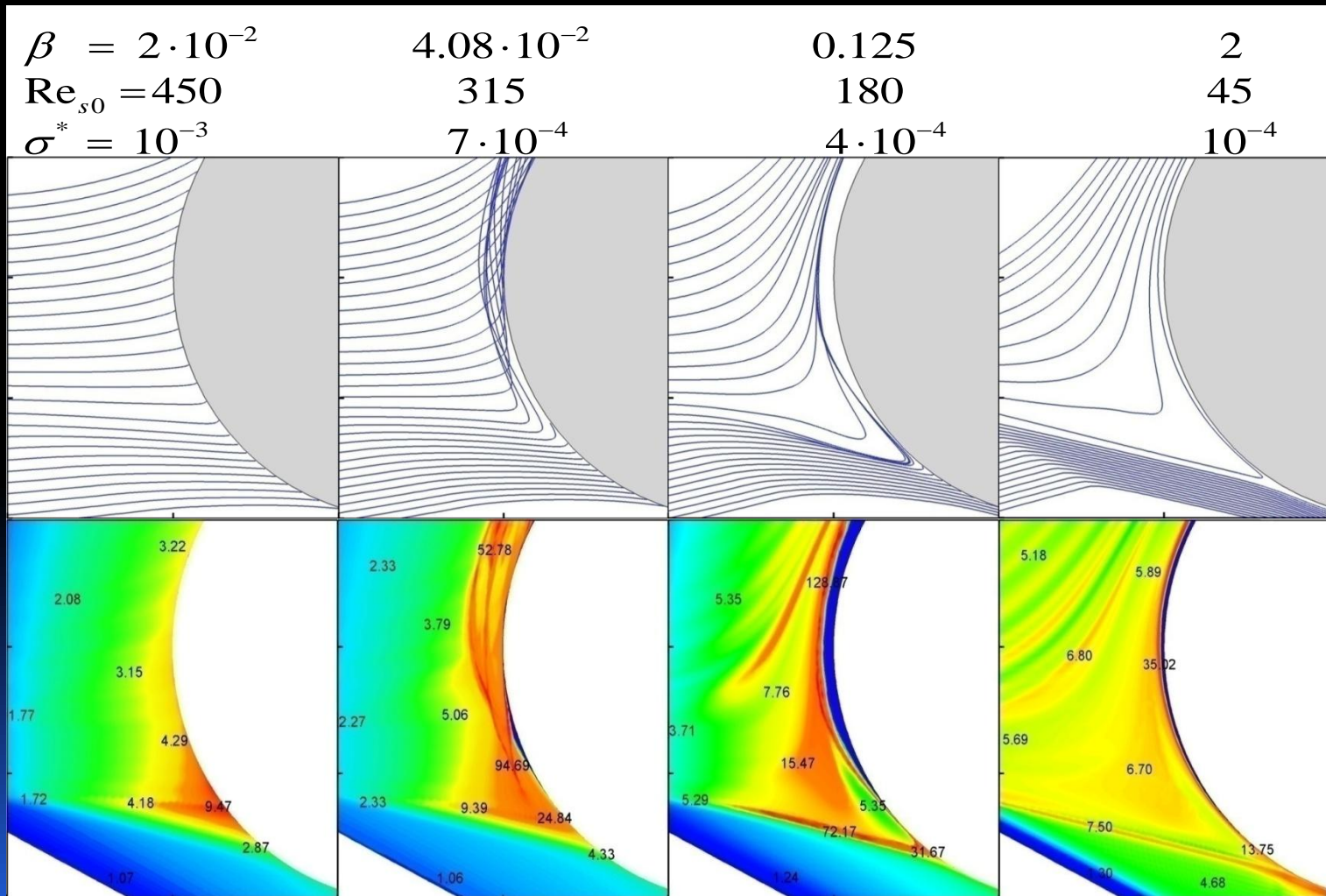


# Траектории и распределение концентрации частиц при IV типе взаимодействия





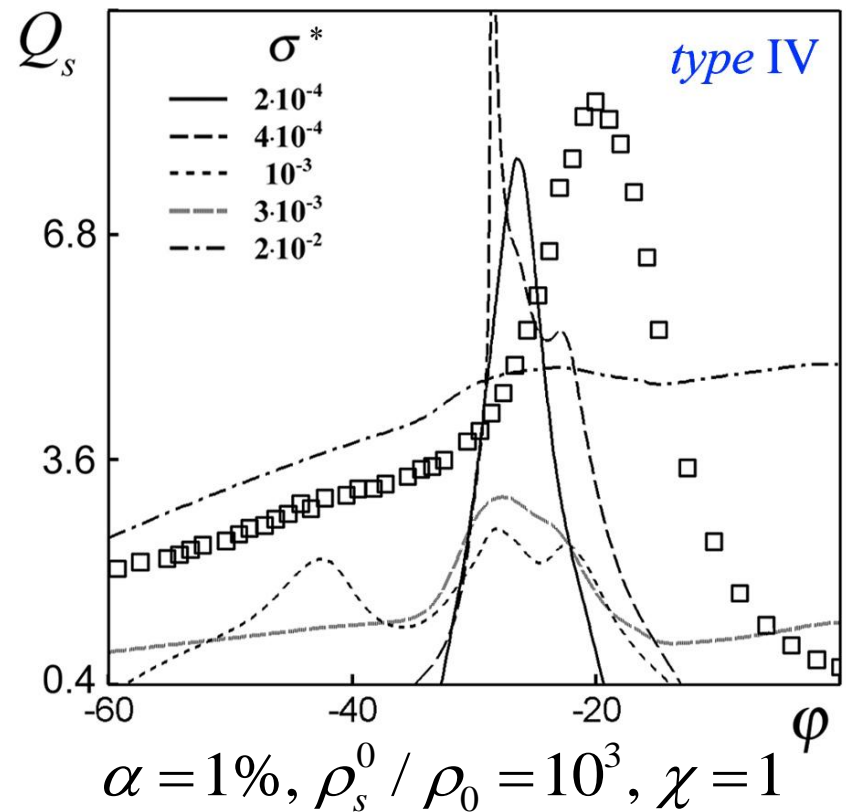
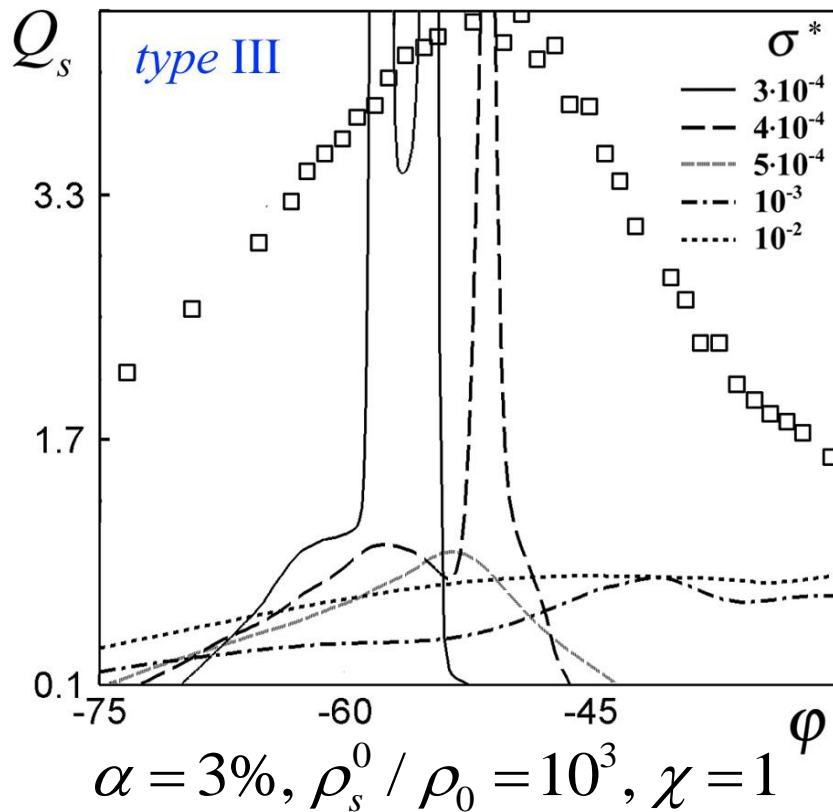
# Траектории и распределение концентрации частиц при III типе взаимодействия





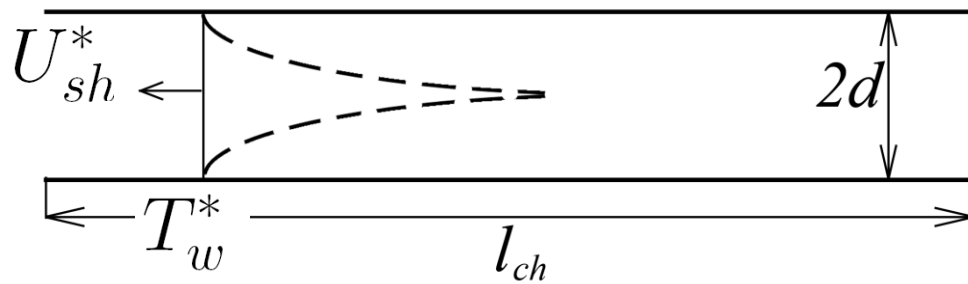
# Полный поток энергии частиц к поверхности цилиндра

$$Q_s = \rho_s V_{sn} \left( \frac{1}{2} V_s^2 + c_s (T_s - T_w) \right) / Q_0$$





# Течение запыленного газа за ударной волной



$$l_{ch} : d \ll l_{ch}, l_{ch} = AL$$

$$L = \frac{d}{\varepsilon} \quad \varepsilon = \frac{1}{\text{Re}_d}$$

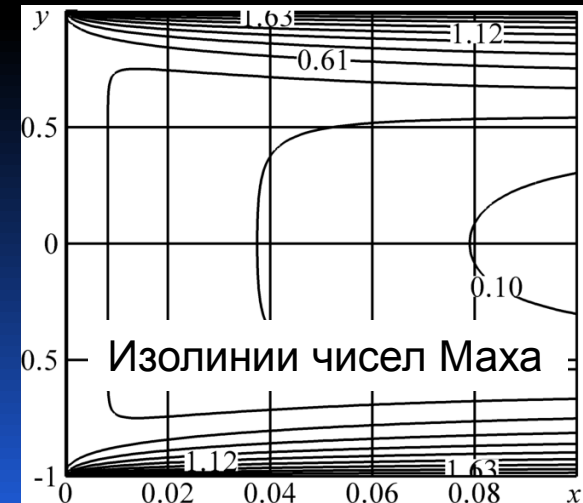
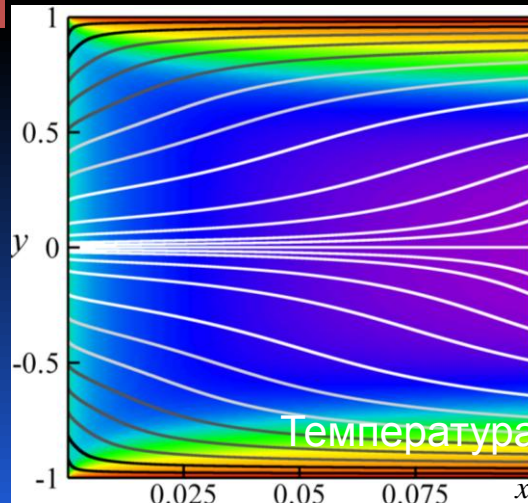
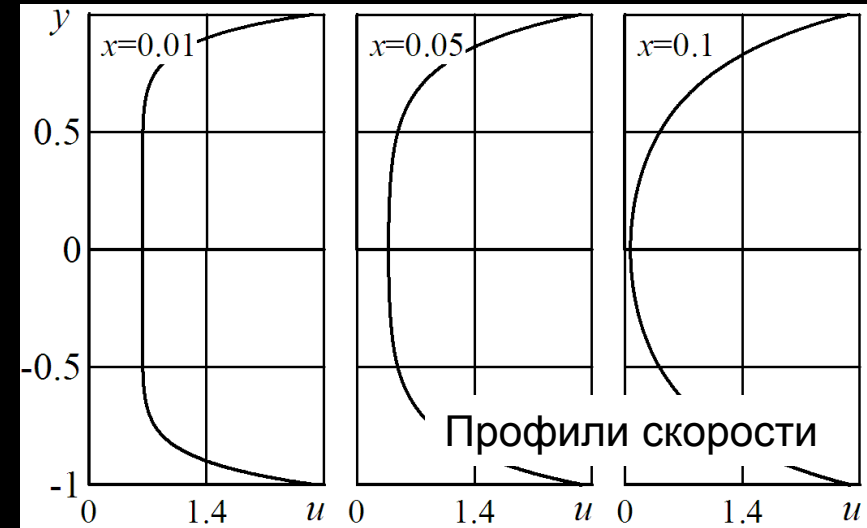
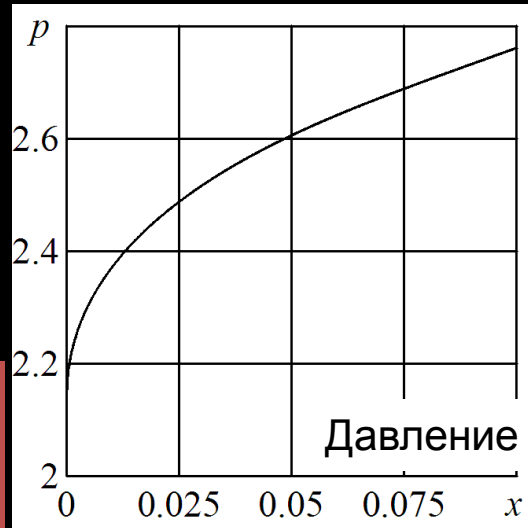
## Безразмерные параметры

$$\gamma, M_+, K, \text{Pr} = \frac{c_p \mu_+^*}{\lambda_+^*}$$
$$\beta = \frac{L}{l_\tau} = \frac{6\pi\sigma\mu_+^* L}{mU_+^*}$$
$$\zeta = 0.545 (\text{Re}_{2\sigma})^{3/2} \left(\frac{\sigma}{d}\right)^{-5/2} \frac{\rho_+^*}{\rho_{sm}}$$
$$\text{Re}_{2\sigma} = \frac{2\rho_+^* \sigma U_+^*}{\mu_+^*}, \quad \chi = \frac{c_p}{c_s}$$



# Течение вязкого совершенного газа

$Pr = 1, K = 1$   
 $\gamma = 1.4, M_\infty = 2$

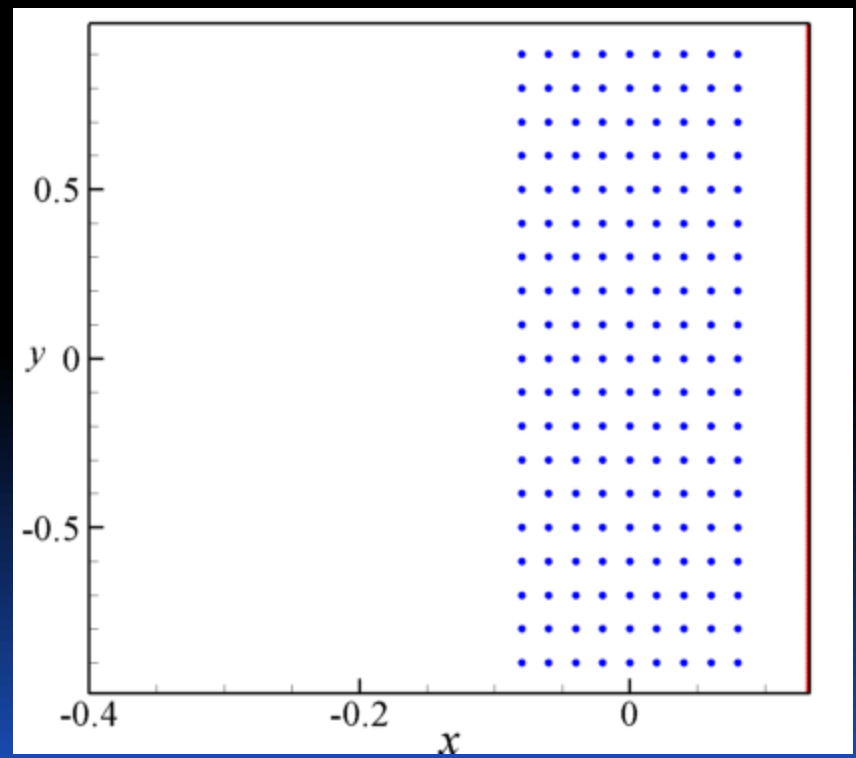
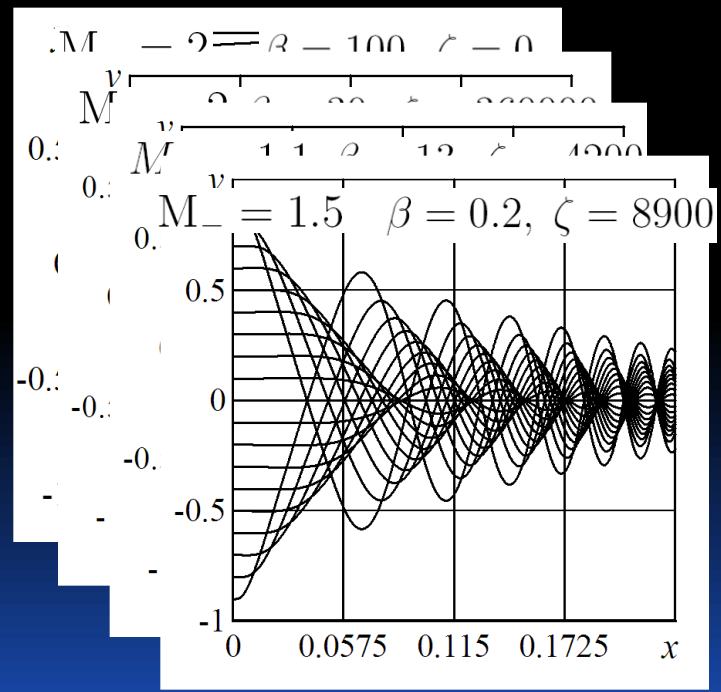






# Траектории частиц

$Pr = 1, K = 1$   
 $\gamma = 1.4, \chi = 2$





# Заключение

- В данной работе приведены две новые схемы течения, в которых возможно проявление эффекта аэродинамической фокусировки частиц: течение запыленного газа в области двух плоских взаимодействующих между собой ударных волн; и за ударной волной, движущейся в узком канале постоянного сечения.
- С использованием лагранжева подхода проведено параметрическое исследование фокусировки частиц, определены условия, соответствующие оптимальным режимам фокусировки для всех трех задач.
- Обнаруженный эффект может быть использован для создания импульсных пучков микрочастиц в технологиях нанесения покрытий (нанотехнологии «директ-райт» и др.), безыгольного внедрения порошковых лекарственных препаратов, а также в технологиях фракционирования аэрозолей.