

# Динамика макрообъёма жидкости, сброшенной с самолёта

В.В. Вышинский, М.А. Кудров,  
А.Л. Стасенко

ФАЛТ МФТИ, ЦАГИ

7 апреля 2010



# Основная задача:

Основываясь на «точных» расчётах, получить простые зависимости, пригодные для быстрого использования в «простой» модели

Верификация численного метода для использования в «точных» расчётах



Серия расчётов с использованием различных параметров



Обработка результатов и получение простых зависимостей

# Верификация

Для точных расчётов была использована «модель смешения», реализованная в CFX.

Для верификации модели были проведены расчёты для условий лабораторного эксперимента

(В.А. Леухин, А.А. Болдырев, ЦАГИ)

# «Модель смешения»

$$\rho_\alpha = \langle \rho_{\alpha i} \rangle,$$

$$U_\alpha = \langle \rho_{\alpha i} U_{\alpha i} \rangle / \langle \rho_{\alpha i} \rangle,$$

$$r_\alpha = V_\alpha / V,$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_\alpha)_\alpha + \nabla \cdot \rho_\alpha \mathbf{U}_\alpha = \theta_\alpha,$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_\alpha \mathbf{U}_\alpha)_\alpha + \nabla \cdot \rho_\alpha \mathbf{U}_\alpha \otimes \mathbf{U}_\alpha = -r_\alpha \nabla p_\alpha + \nabla \cdot \mu_\alpha (\nabla \mathbf{U}_\alpha + (\nabla \mathbf{U}_\alpha)^T) + \mathbf{f}_{D\alpha}$$

$$\mathbf{f}_{D\alpha} = D(\mathbf{r}_1 \mathbf{r}_1 + \mathbf{r}_2 \mathbf{r}_2) S |U_{3-\alpha} - U_\alpha| U_{3-\alpha} - U_\alpha \quad \text{E } 2,$$

$$S = r_1 r_2 / d,$$

$$d = 5 \cdot 10^{-5}$$

$k$  – модель

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_\alpha k)_\alpha + \nabla \cdot \rho_\alpha \mathbf{U}_\alpha k_\alpha = r_\alpha P_\alpha - \rho_\alpha \varepsilon_\alpha + \nabla \cdot (\mu_\alpha + \frac{\mu_\alpha}{\sigma_k}) \nabla k_\alpha$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_\alpha \varepsilon_\alpha)_\alpha + \nabla \cdot \rho_\alpha \mathbf{U}_\alpha \varepsilon_\alpha = r_\alpha \left( \frac{\varepsilon_\alpha}{k_\alpha} C_{\varepsilon 1} P_\alpha - \rho_\alpha \varepsilon_\alpha \right) + \nabla \cdot (\mu_\alpha + \frac{\mu_\alpha}{\sigma_\varepsilon} \varepsilon \nabla)_\alpha$$

$$P_\alpha = \mu_{\alpha} \nabla U_\alpha \cdot (\nabla U_\alpha + \nabla U_\alpha^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot U_\alpha (3\mu_{\alpha} \nabla \cdot U_\alpha + \rho_\alpha k_\alpha),$$

$$\mu_\alpha = C_\mu \rho_\alpha k_\alpha^2 / \varepsilon_\alpha, \quad \mu_{\alpha \text{eff}} = \mu_\alpha + \mu_\alpha, \quad \sigma_k = 1,0 \quad \sigma_\varepsilon = 3,$$

$$C_{\varepsilon 1} = 1,44, \quad C_{\varepsilon 2} = 1,92, \quad C_\mu = 0,09.$$

$$F_\sigma = \kappa \sigma |\nabla r_2|$$

$$\nabla \cdot \mathbf{U}_\alpha = \frac{\partial U_x}{\partial x} + \frac{\partial U_y}{\partial y},$$

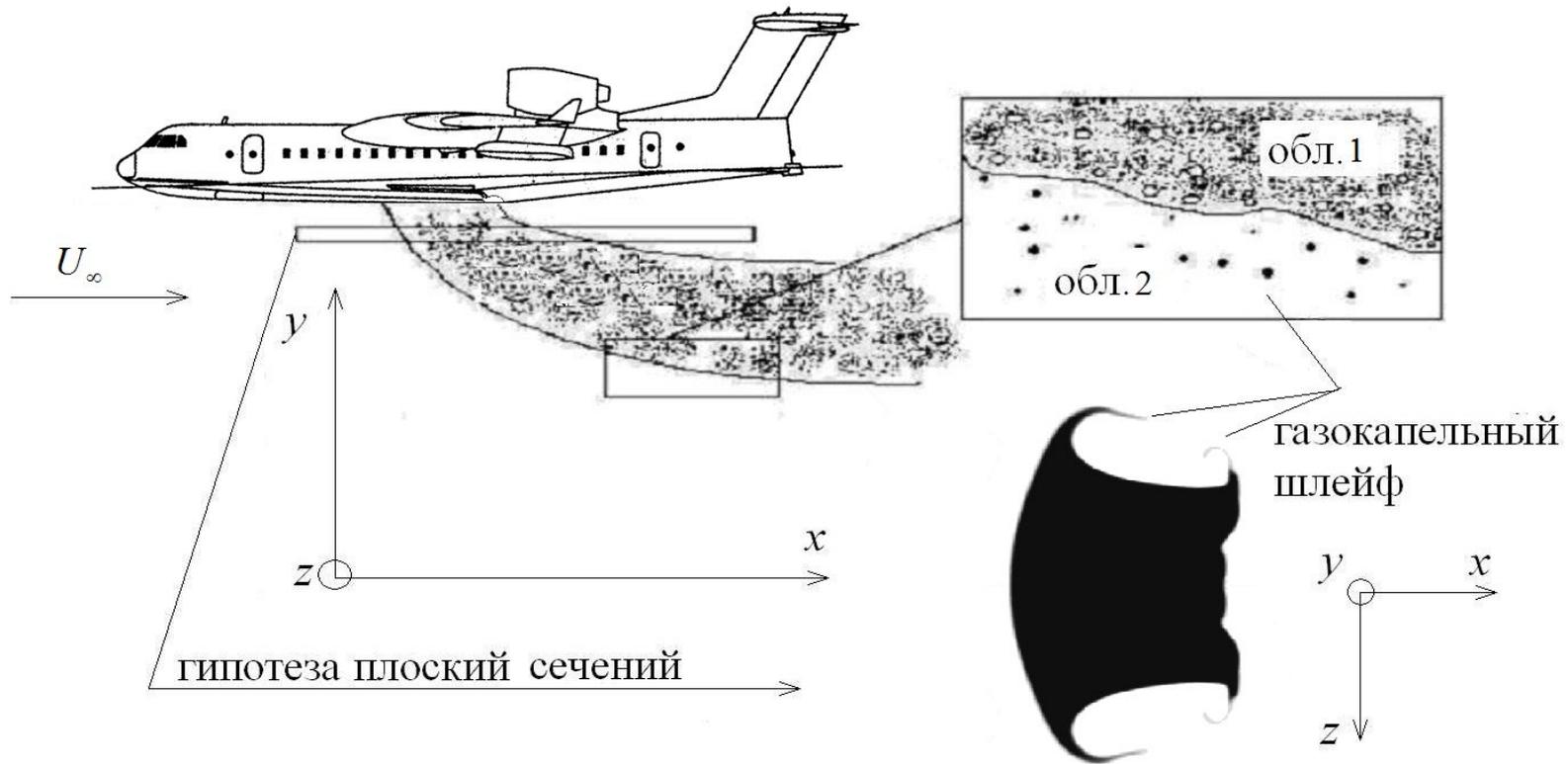
$$\mathbf{U}_\alpha \otimes \mathbf{U}_\alpha = \begin{pmatrix} U_x^2 & U_x U_y \\ U_y U_x & U_y^2 \end{pmatrix},$$

$$\nabla \mathbf{U}_\alpha = \begin{pmatrix} \frac{\partial U_x}{\partial x} & \frac{\partial U_y}{\partial x} \\ \frac{\partial U_x}{\partial y} & \frac{\partial U_y}{\partial y} \end{pmatrix},$$

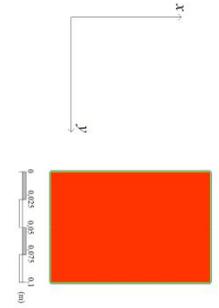
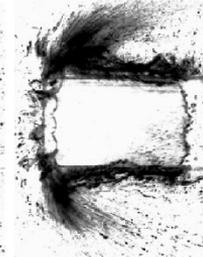
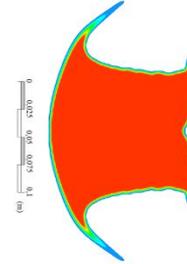
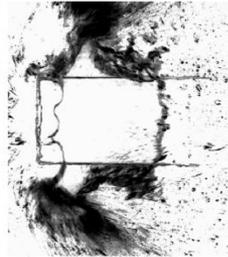
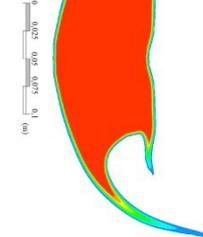
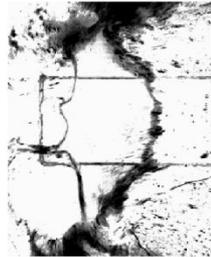
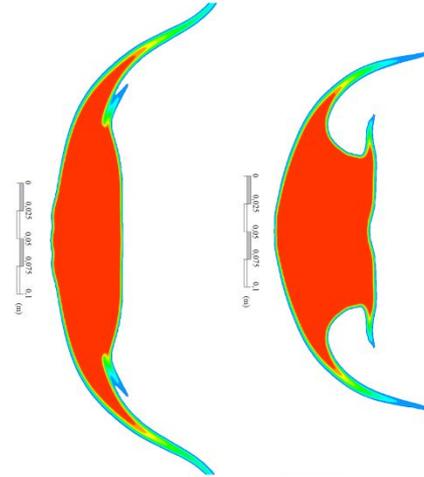
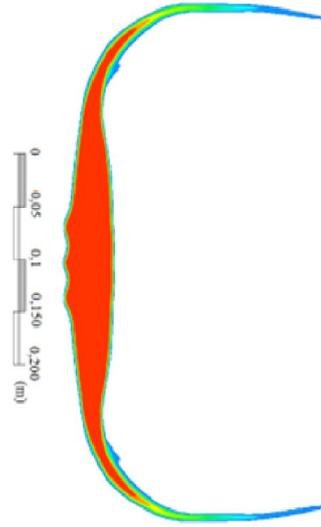
$$\nabla \cdot (\mathbf{U}_\alpha \otimes \mathbf{U}_\alpha) = \begin{pmatrix} \frac{\partial U_x^2}{\partial x} + \frac{\partial U_x U_y}{\partial y} \\ \frac{\partial U_y U_x}{\partial x} + \frac{\partial U_y^2}{\partial y} \end{pmatrix},$$

$$\nabla p = i \frac{\partial p}{\partial x} + j \frac{\partial p}{\partial y} = \begin{pmatrix} \frac{\partial p}{\partial x} \\ \frac{\partial p}{\partial y} \end{pmatrix}.$$

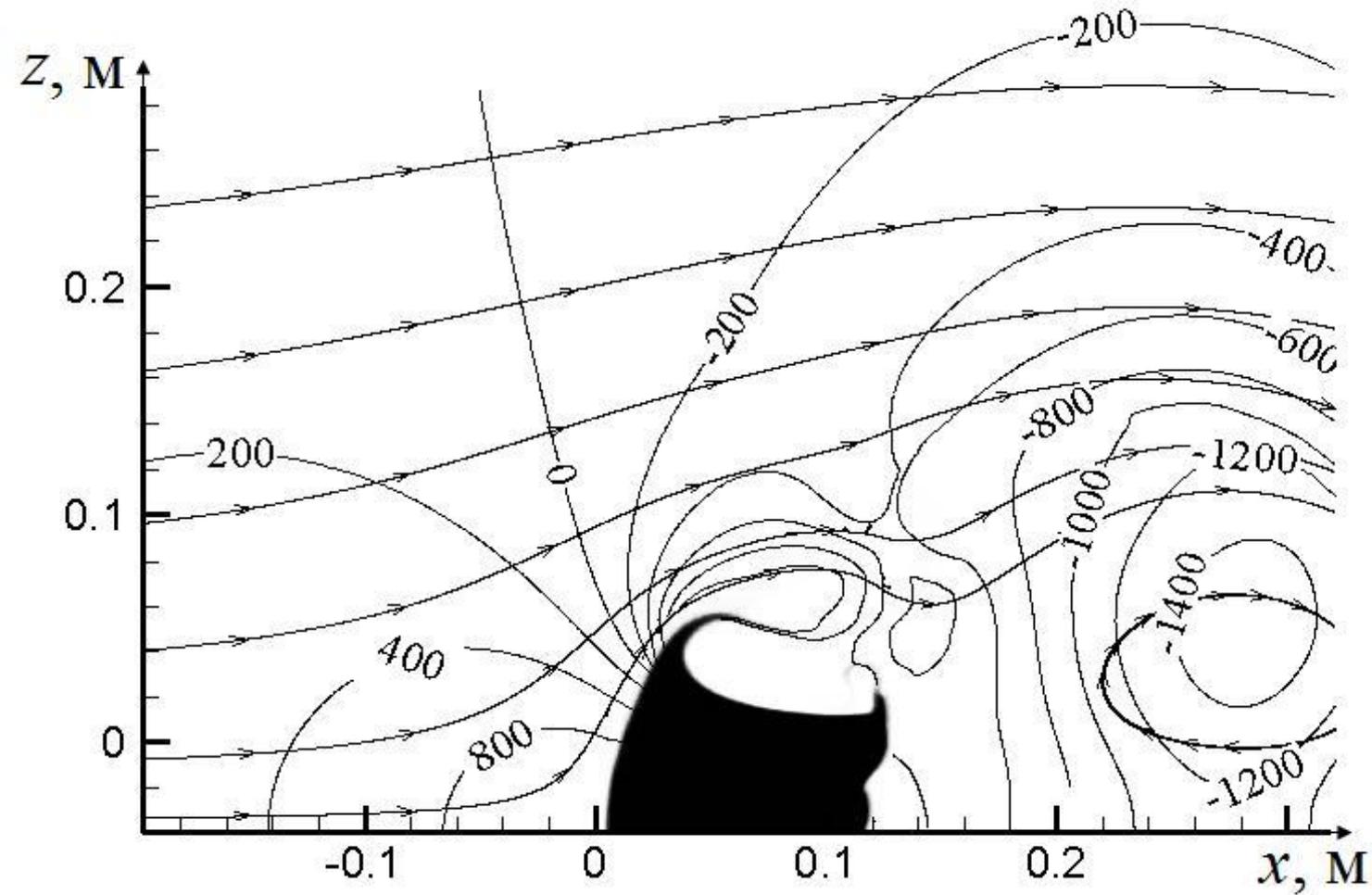
# Гипотеза плоских сечений



# Сравнение результатов численного моделирования и лабораторного эксперимента

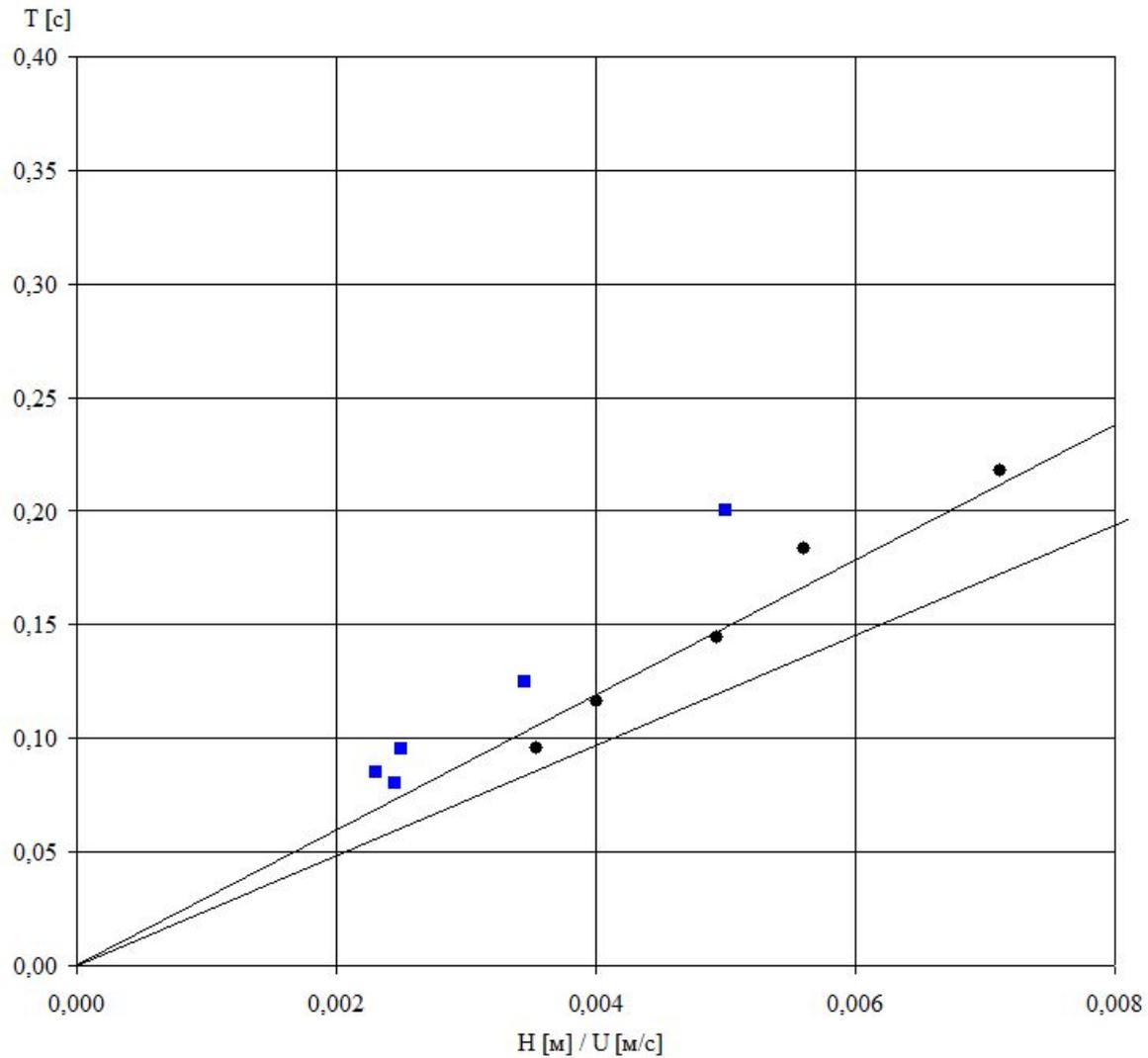


# Распределение давления

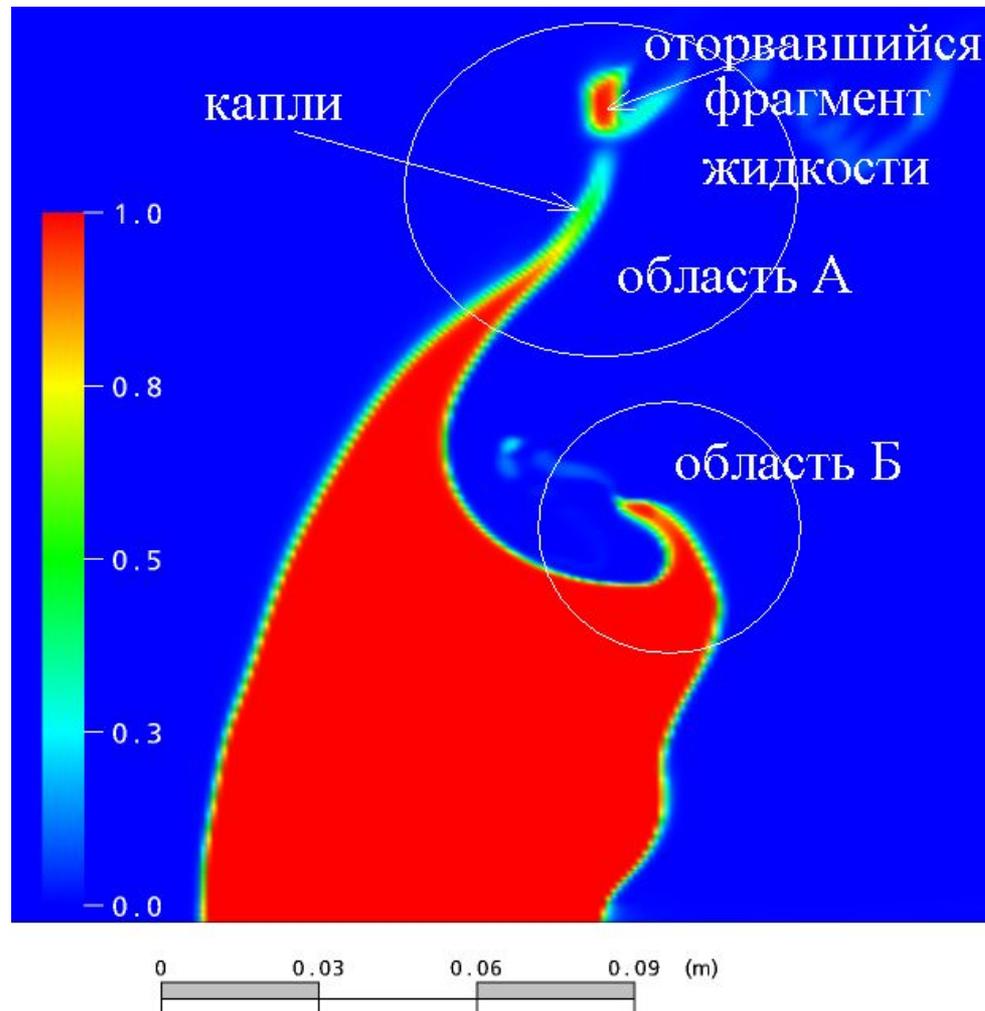


$$\frac{\Delta p}{\tau} \approx \frac{10^3}{\mu_g U_\infty / \delta} \approx 10^3$$

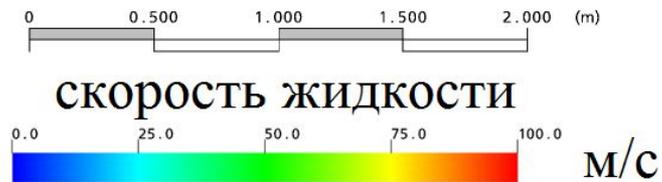
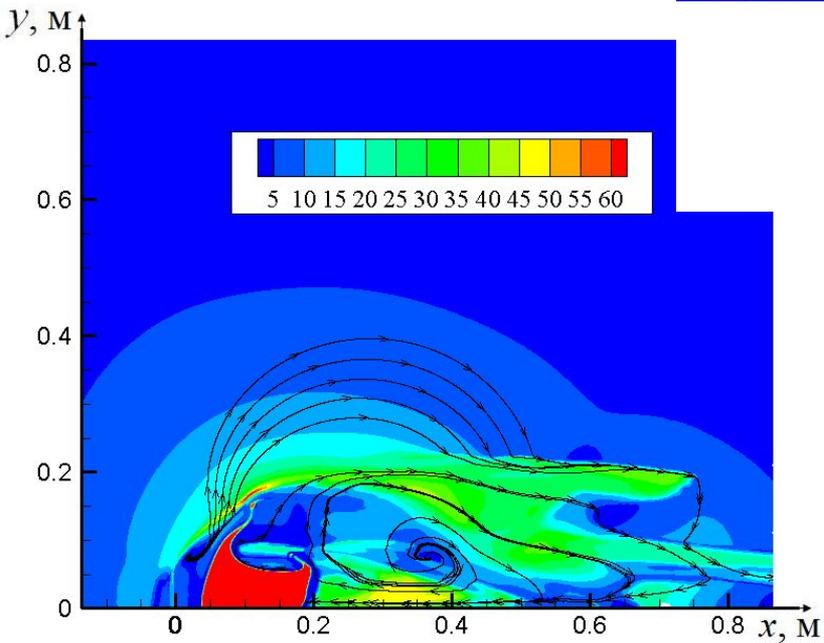
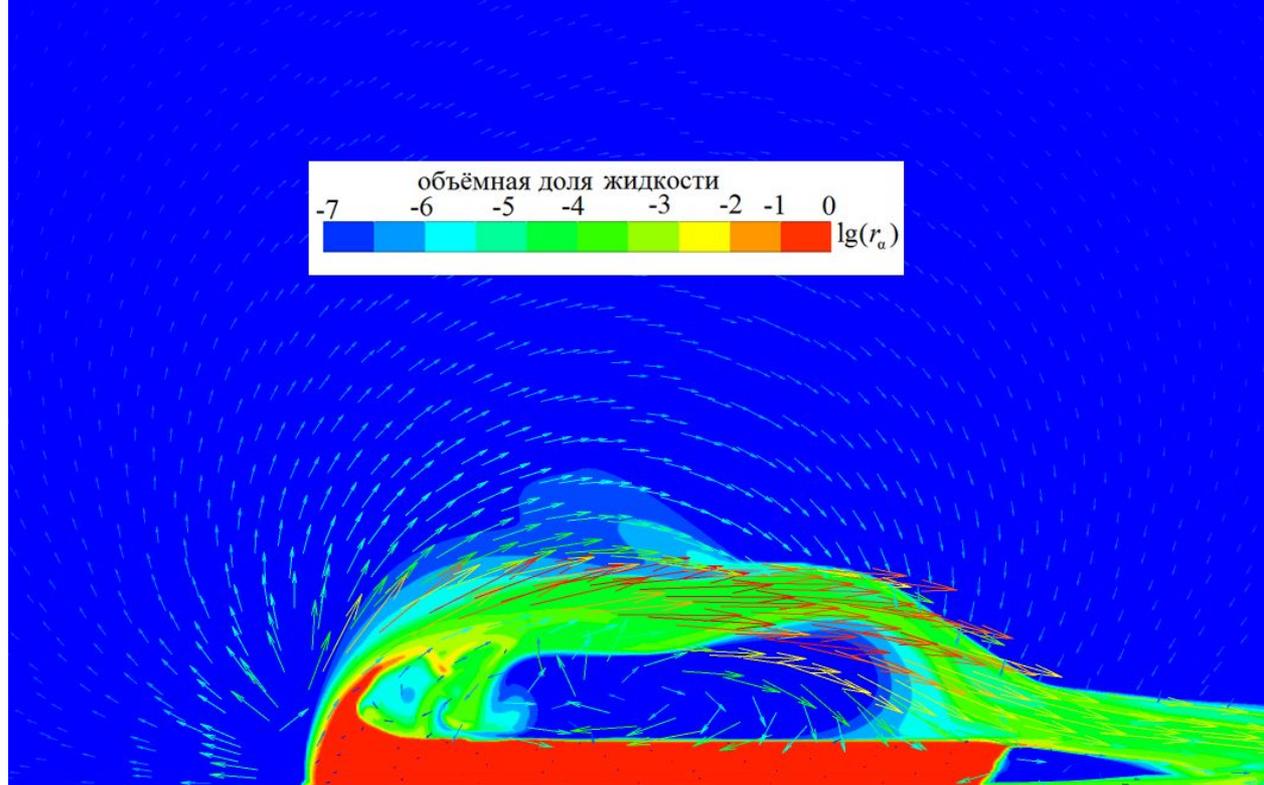
# Время дробления



# Срыв происходит с передней части жидкости

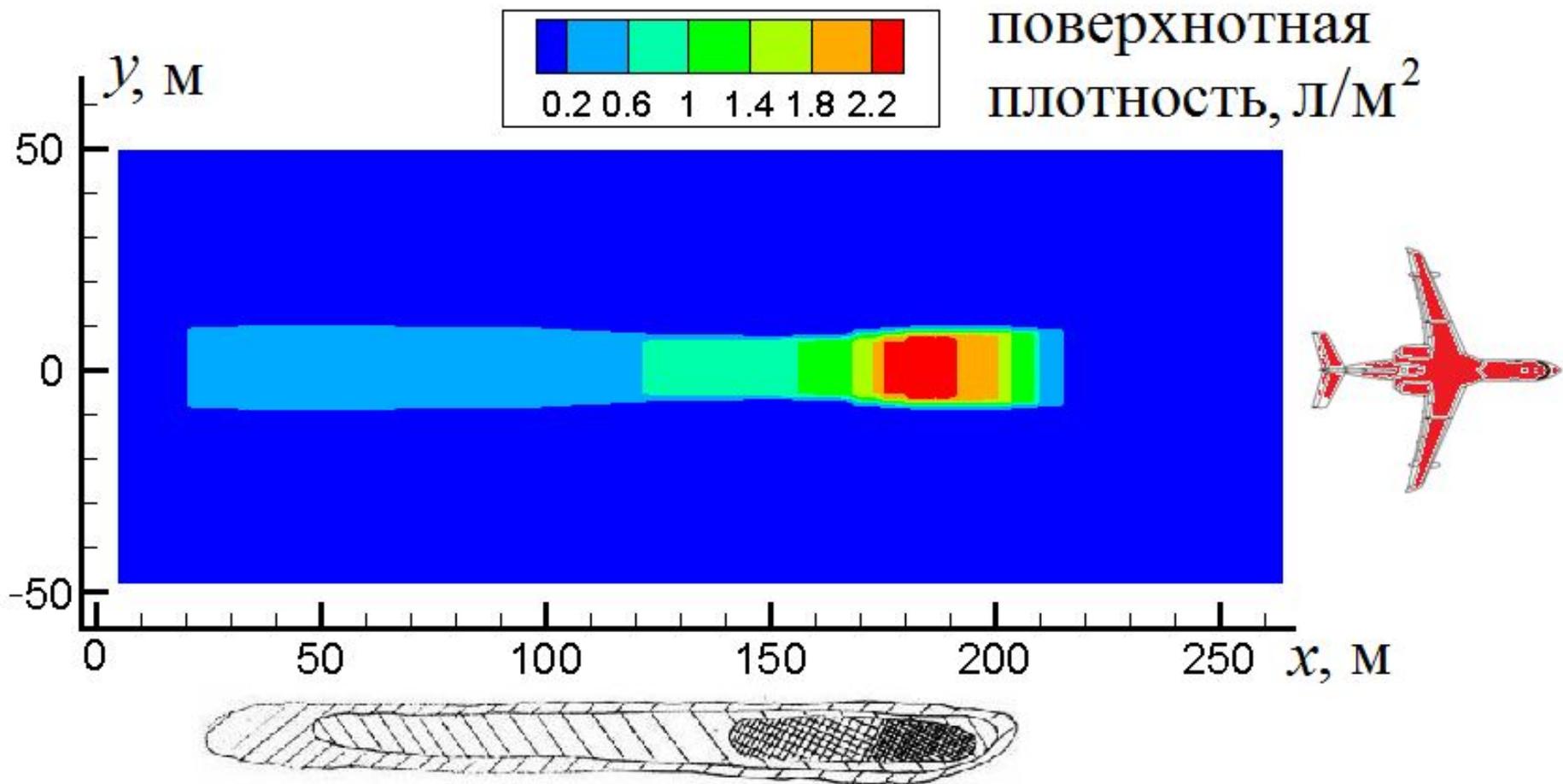


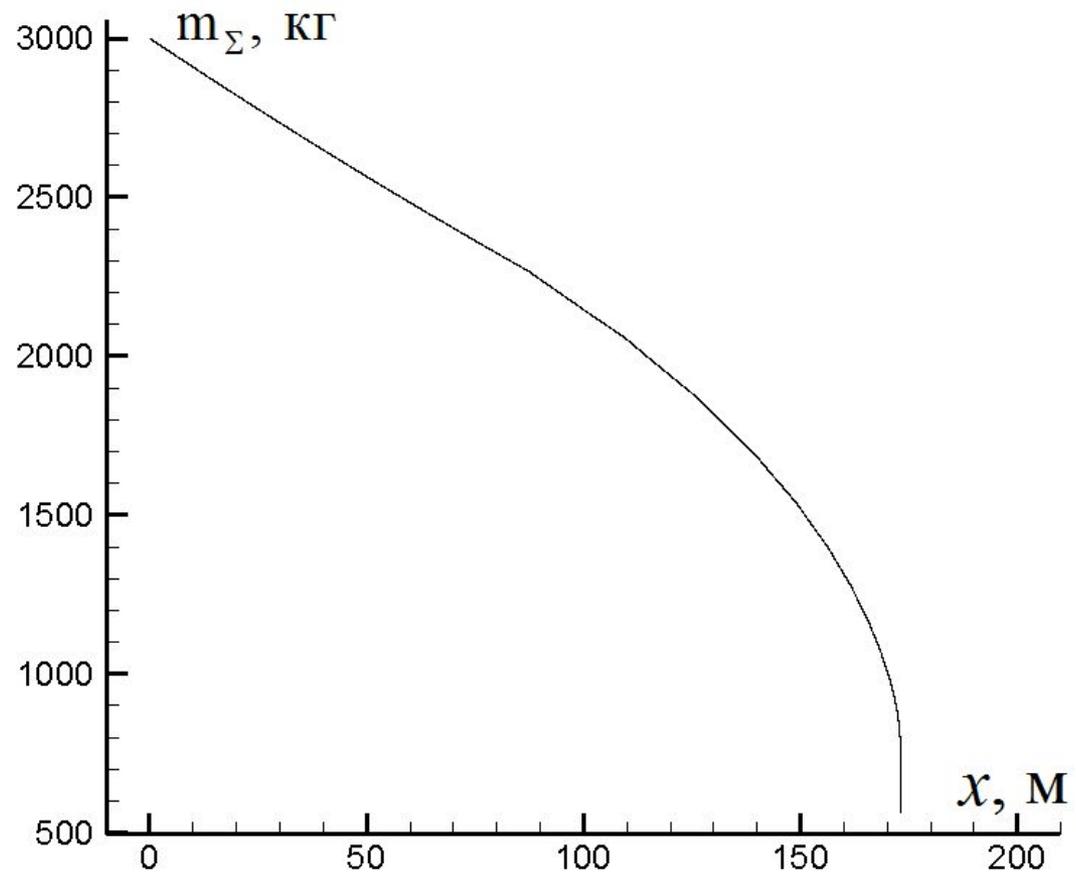
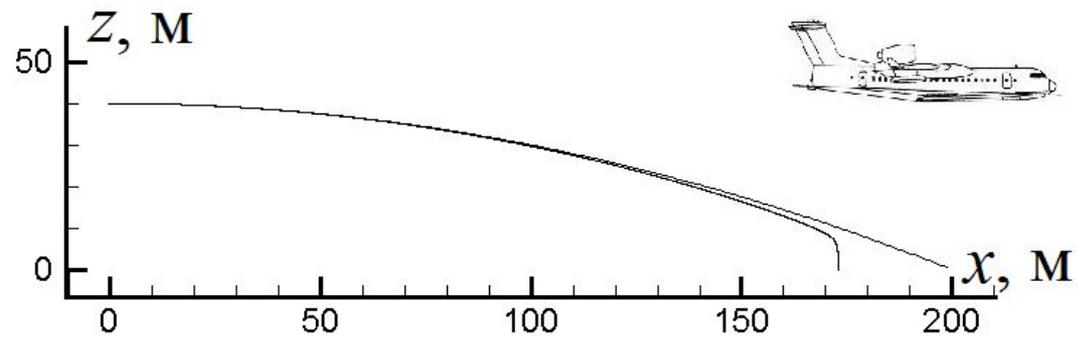
# Срывающиеся капли попадают в вихрь



# «Простая» модель

- дробление жидкости на фрагменты в вертикальном и горизонтальном направлениях
- срыв капель
- динамика капель в следе
- диффузия капель с учётом повышенной турбулентности
- увеличение площади взаимодействия жидкости с воздухом







**Спасибо за внимание!**