

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»

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

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

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

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_\alpha)_\alpha + \nabla \cdot \rho_\alpha U_\alpha = \Theta_\alpha,$$

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

$$f_{D\alpha} = D(\rho_{11} + \rho_{22}) S |U_{3-\alpha} - U_\alpha| U_{3-\alpha} - U_\alpha \quad \text{if } 2,$$

$$S = r_1 r_2 / d,$$

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

k – модель

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

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

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

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

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

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

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

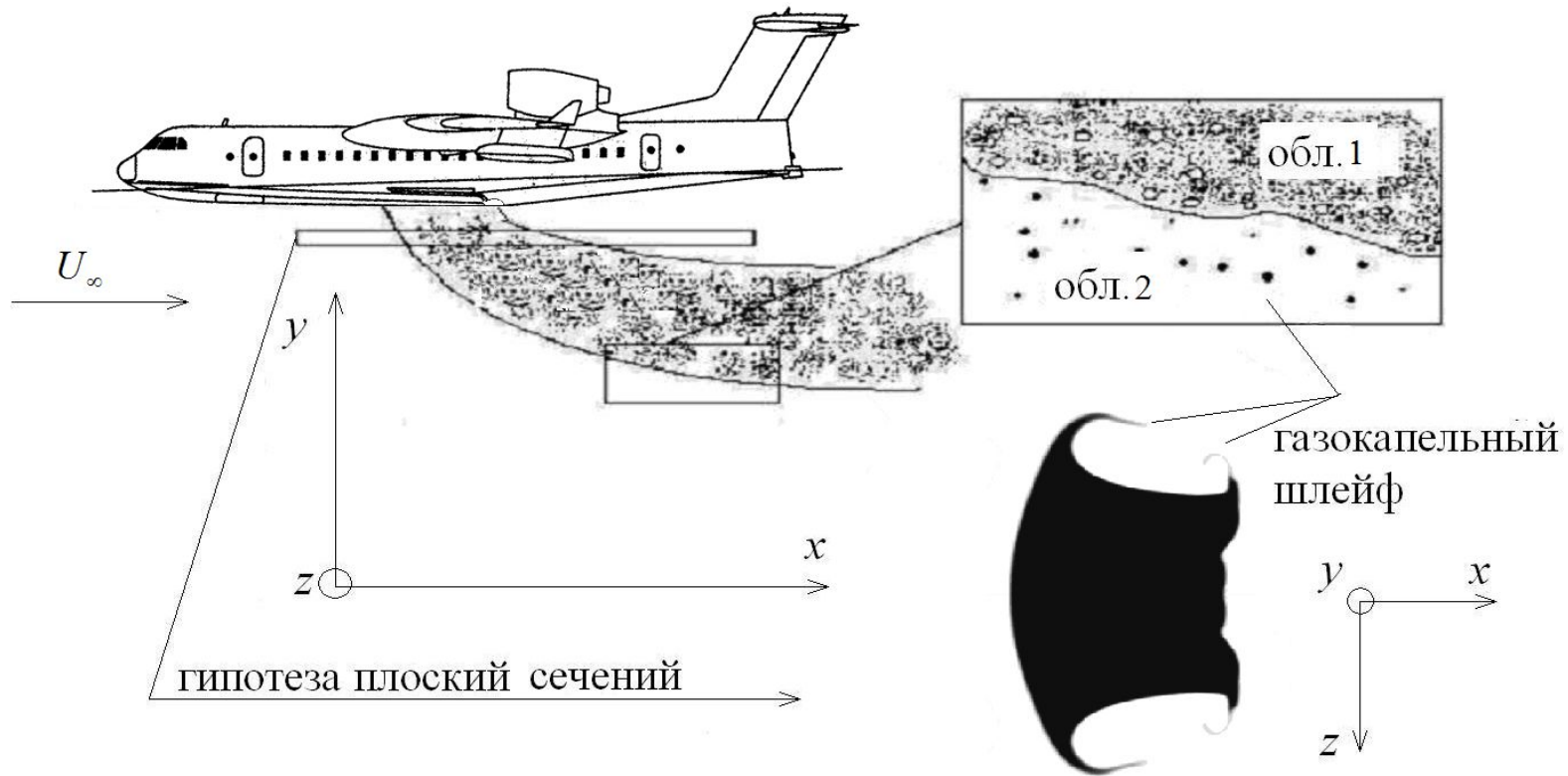
$$U_\alpha \otimes U_\alpha = \begin{pmatrix} U_x^2 & U_x U_y \\ U_y U_x & U_y^2 \end{pmatrix},$$

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

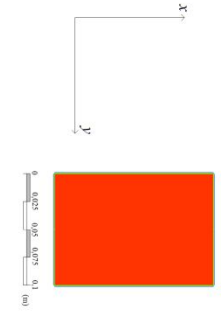
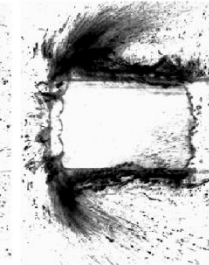
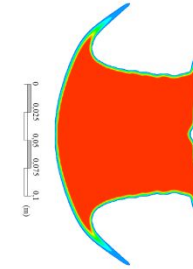
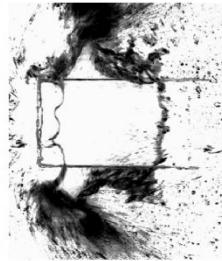
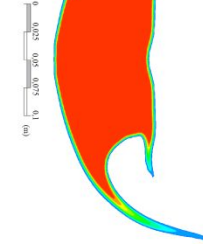
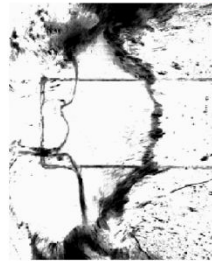
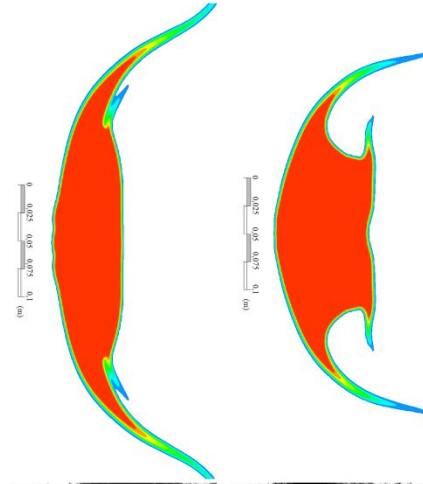
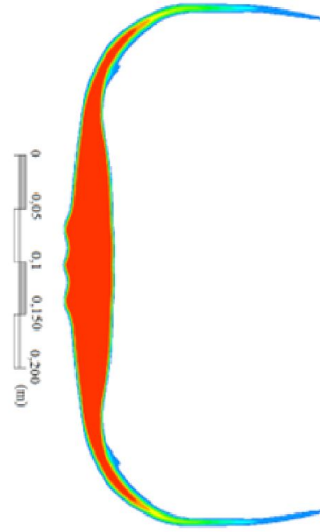
$$\nabla \cdot (U_\alpha \otimes U_\alpha) = \begin{pmatrix} \frac{\partial U_x^2}{\partial x} + \frac{\partial U_x U_y}{\partial y} \\ \frac{\partial U_y U_x}{\partial x} + \frac{\partial U_y^2}{\partial y} \end{pmatrix},$$

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

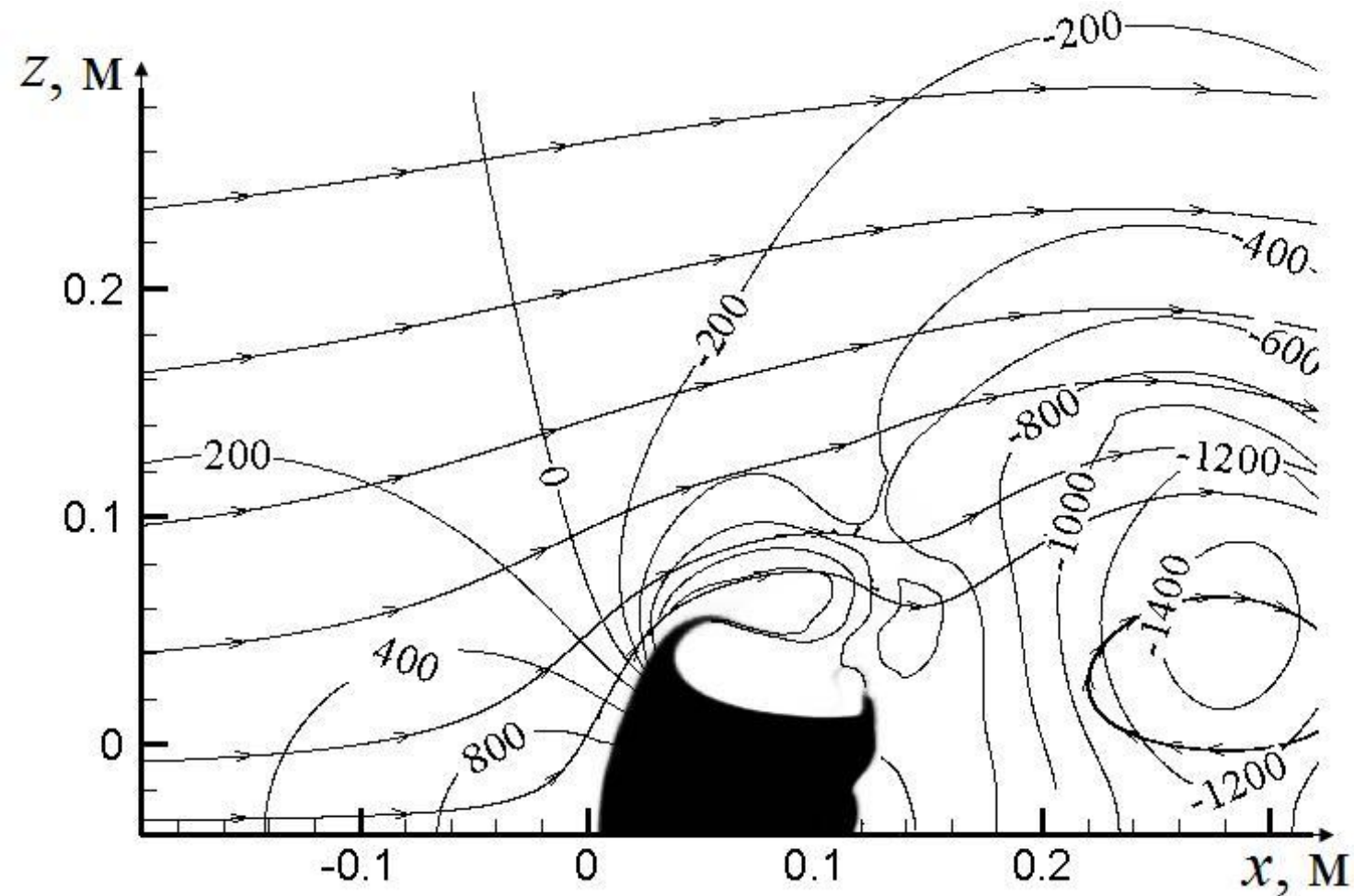
Гипотеза плоских сечений



Сравнение результатов численного моделирования и лабораторного эксперимента

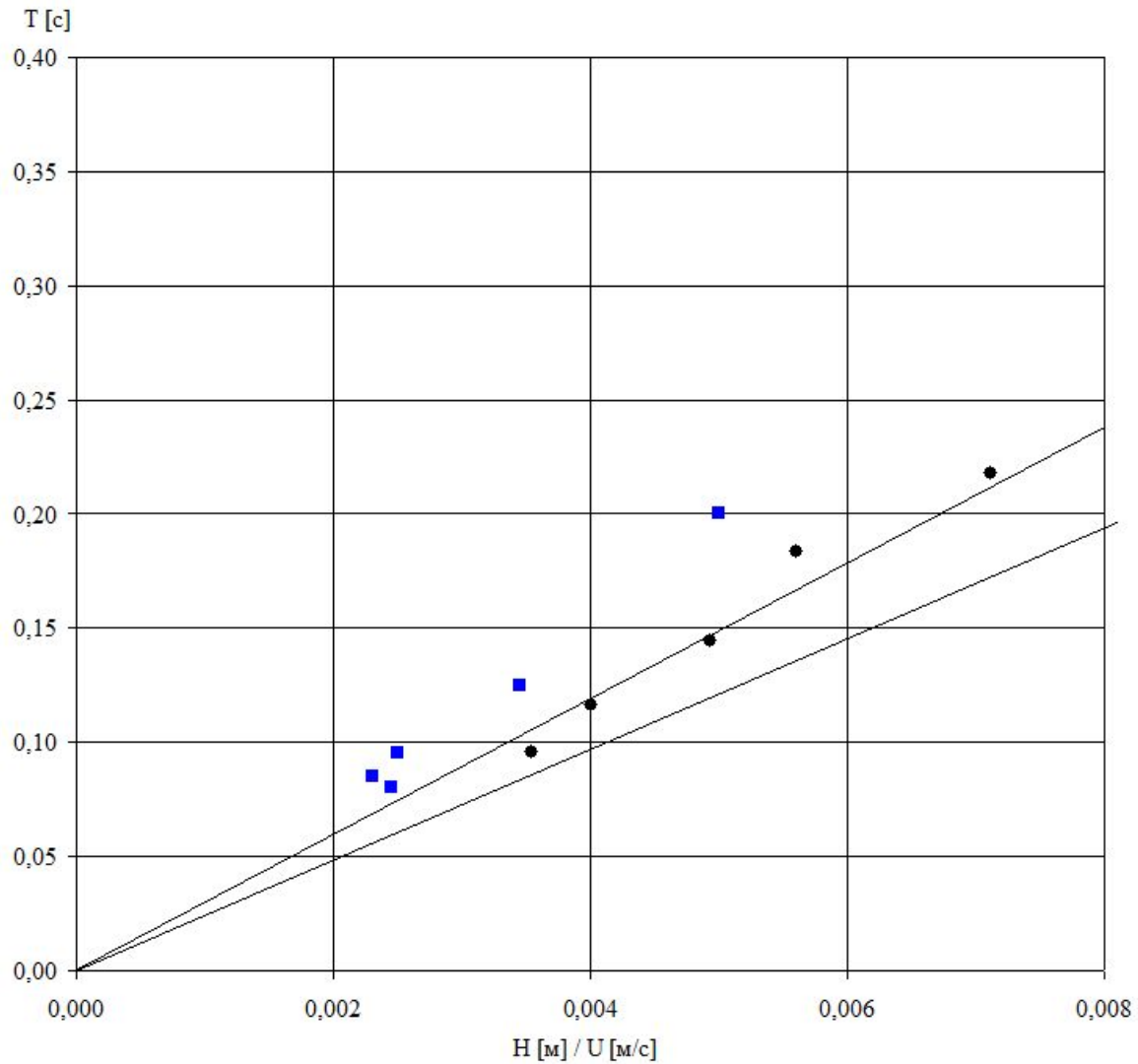


Распределение давления

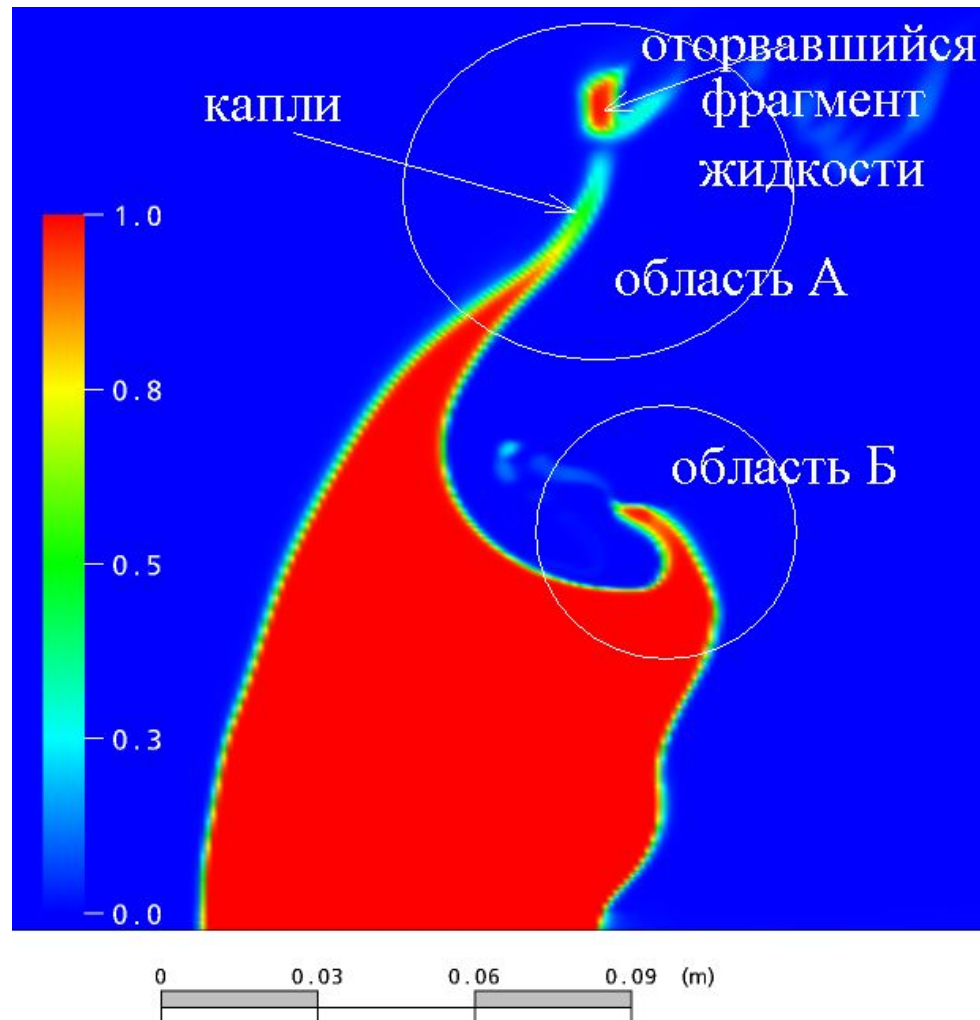


$$\frac{\Delta p}{\tau} \approx \frac{10^3}{\mu_g U_\infty / \delta} \approx 10^3$$

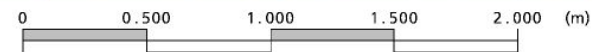
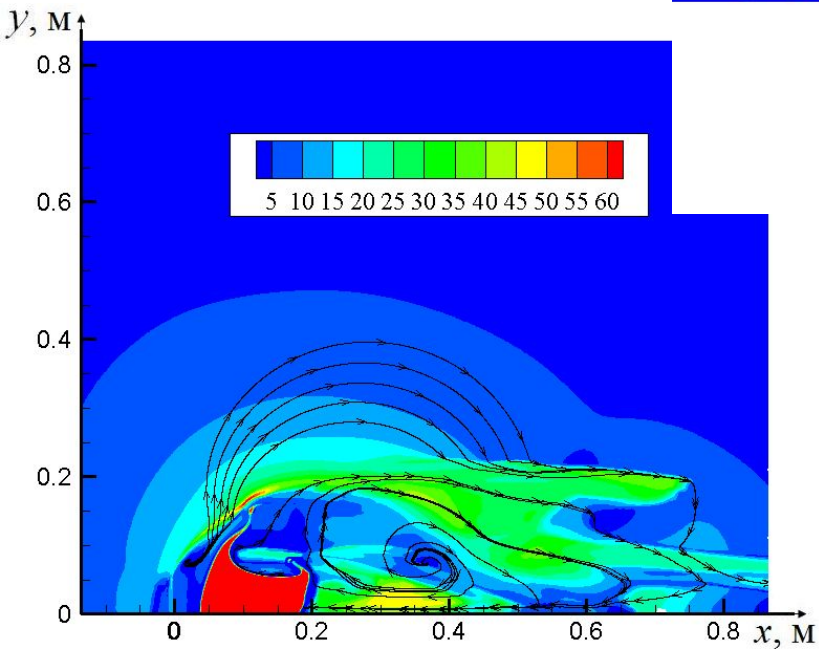
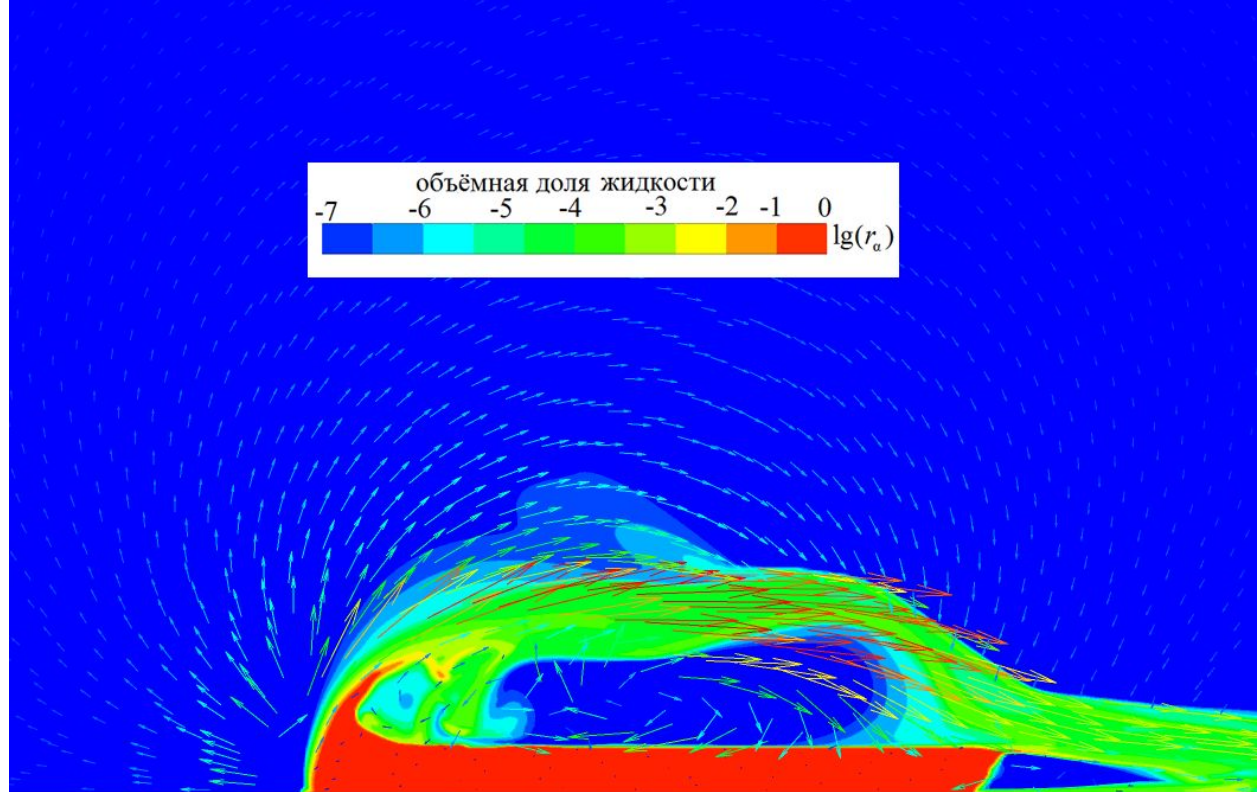
Время дробления



Срыв происходит с передней части жидкости

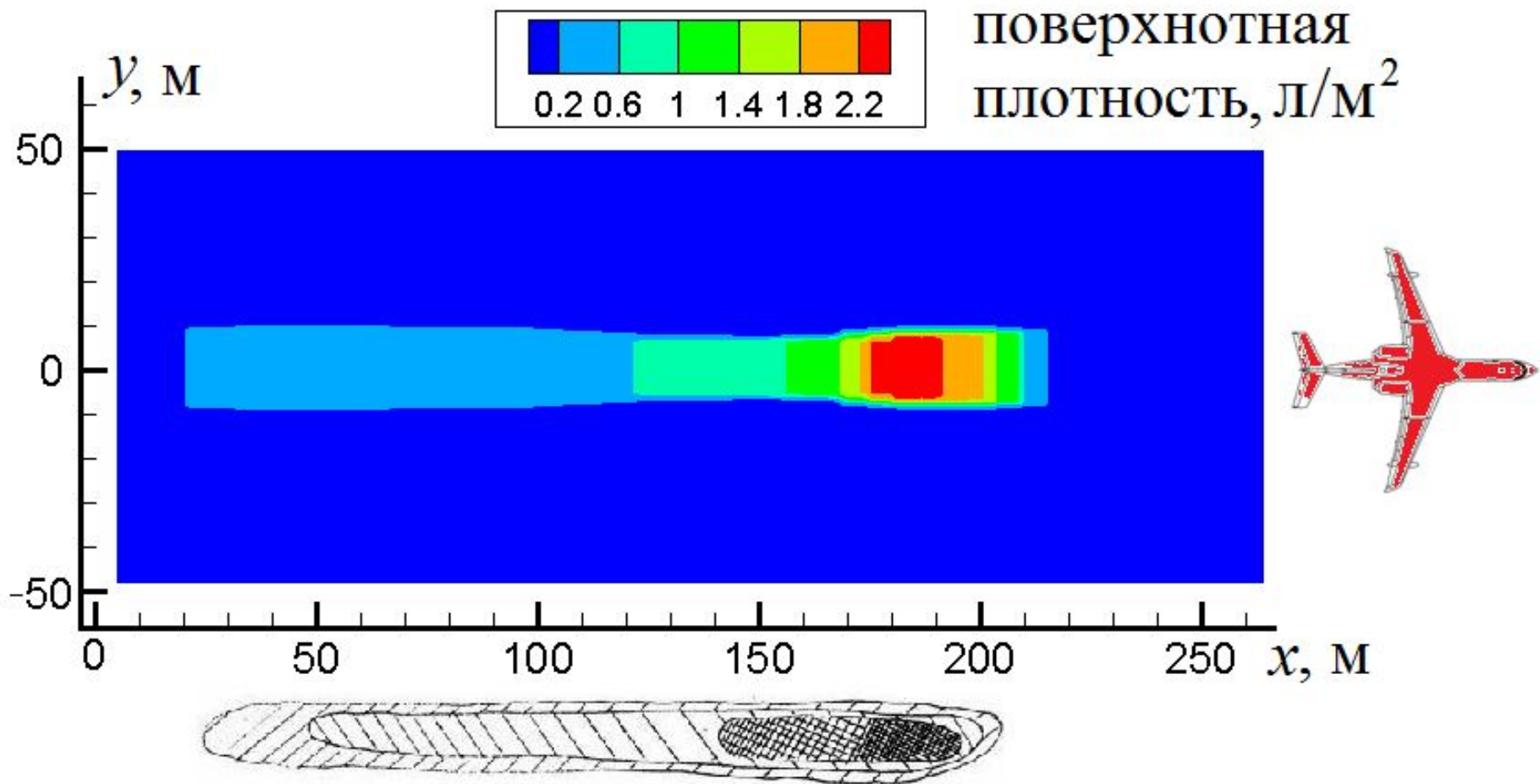


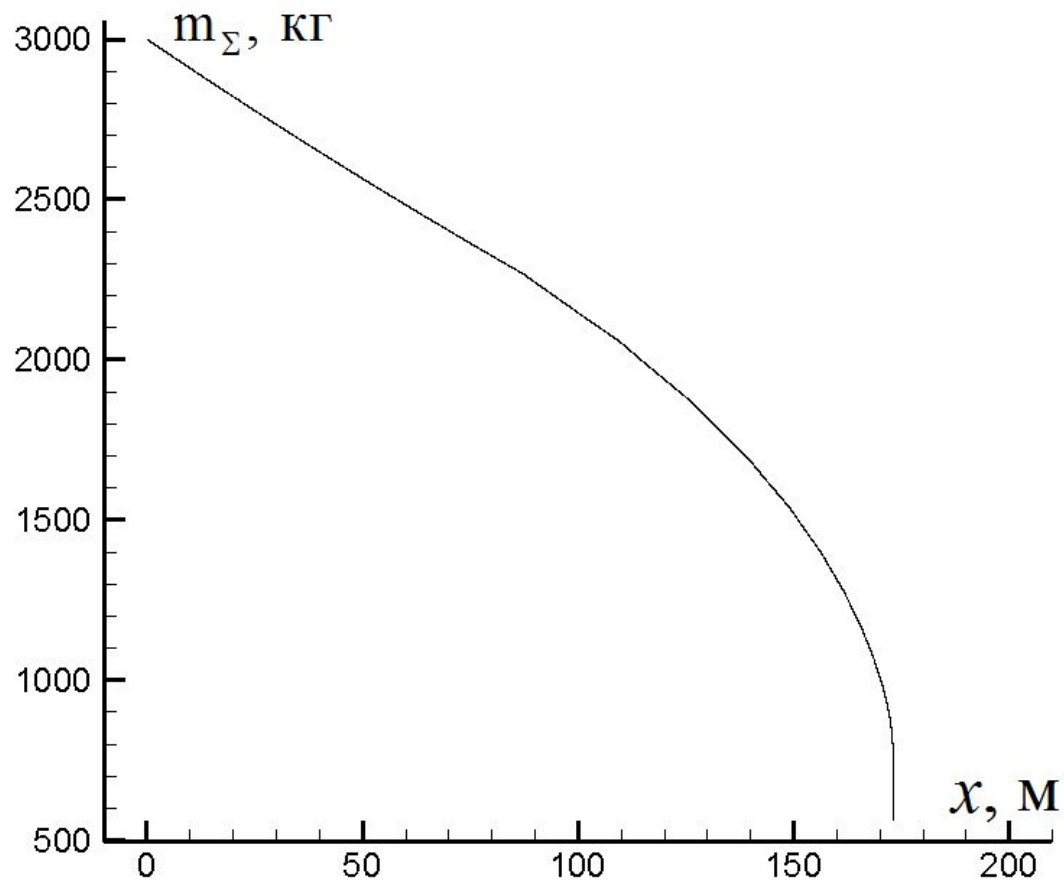
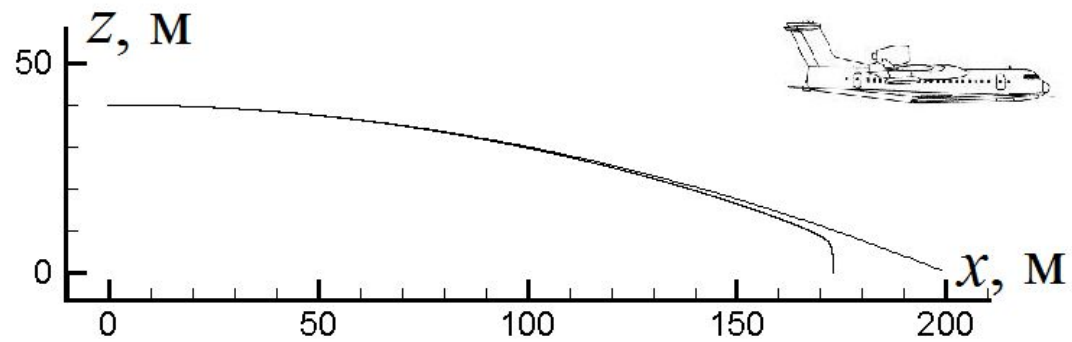
Срывающиеся капли попадают в вихрь



«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!