

# Особенности моделирования обтекания тел в закрученном дозвуковом потоке газа

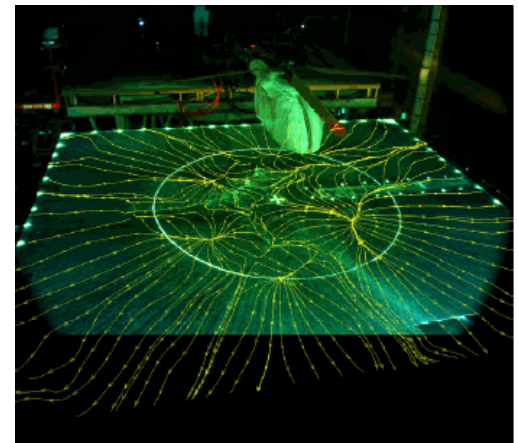
Сергей Стрижак  
МГТУ им. Н.Э. Баумана

III конференция «Облачные вычисления:  
образование, исследования, разработки»

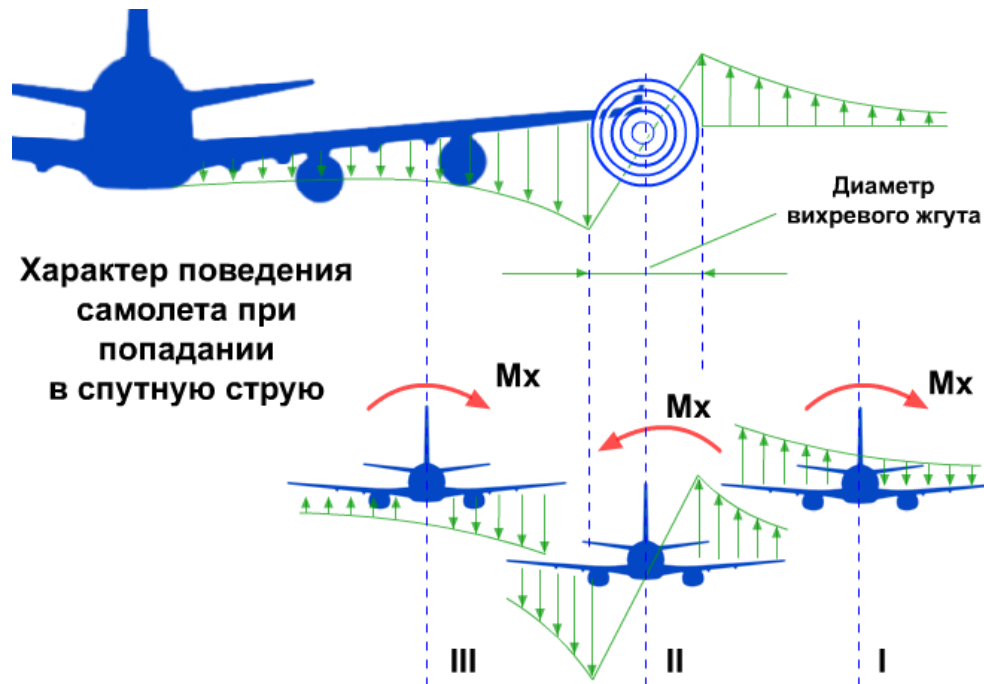
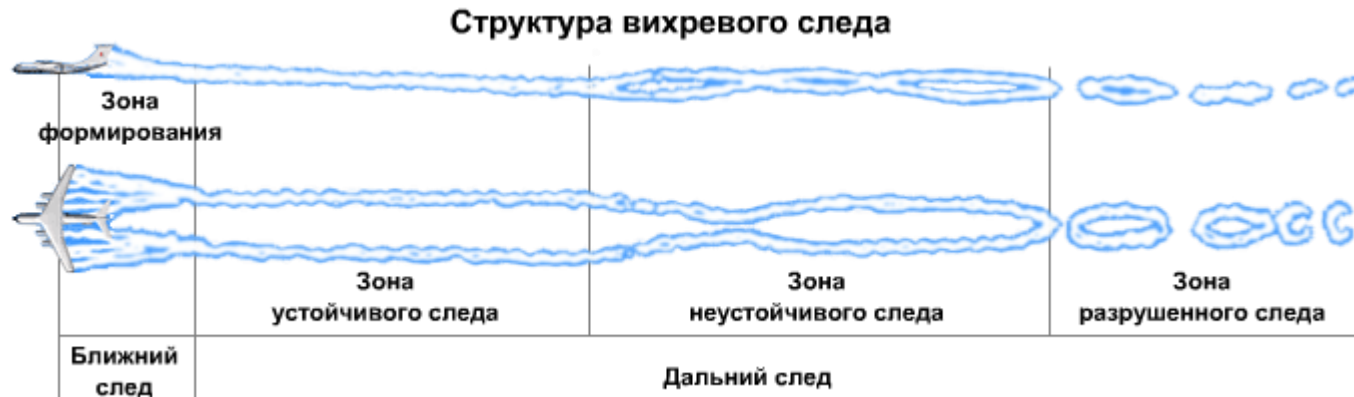
Москва, 6-7 декабря, 2012

# Закрученные течения в природе и в технике

- Ураганы, торнадо, смерчи
- Различные трубы, камеры сгорания, форсунки, транспортные средства
- Многофазные дозвуковые и сверхзвуковые течения
- Неравномерный скошенный поток
- Рециркуляционные зоны
- - Вибрации, разрушительное воздействие.  
+ Стабилизация пламени.
- Сложность в численном моделировании.  
3D расчет.
- Дорогостоящий эксперимент (PIV)

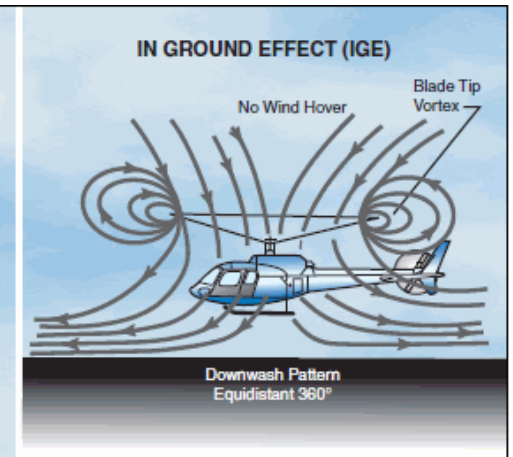
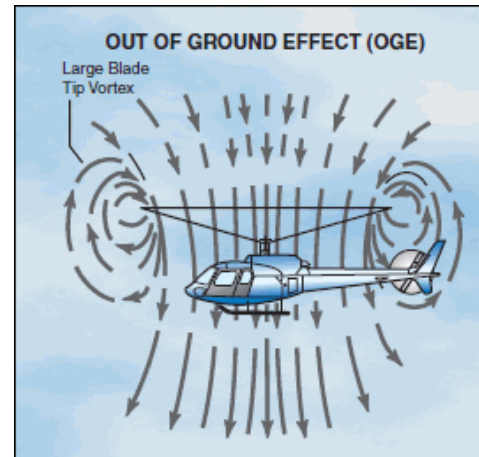
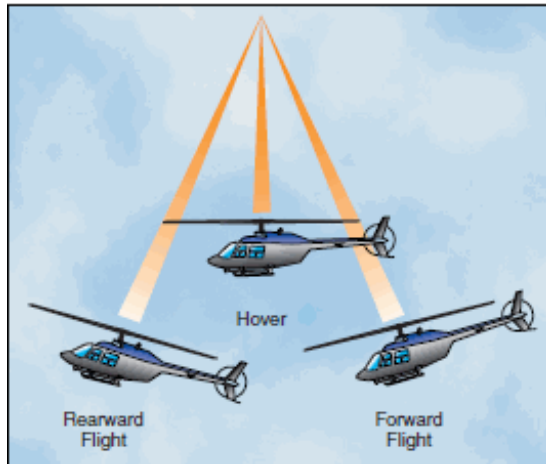


# Вихревые следы за самолетом



Расчетные методы: URANS, LES, вихревые методы

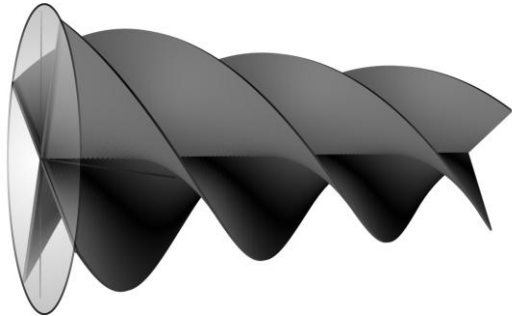
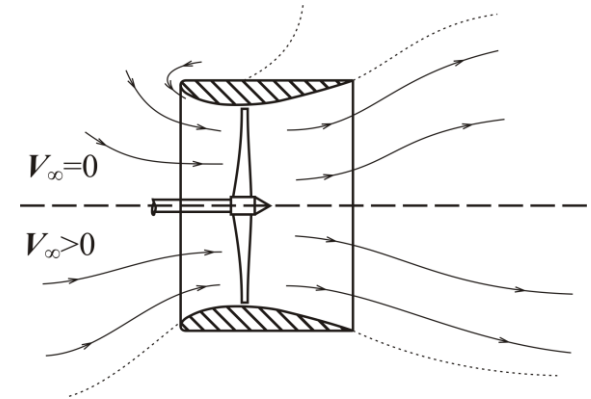
# Транспортное средство. Вертолет.



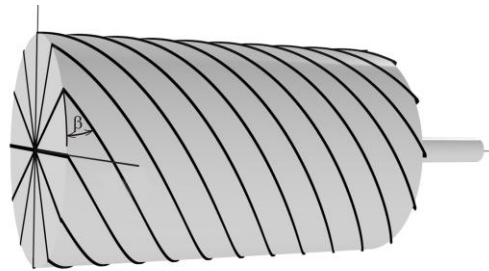
Многочисленные аварии и поломки



# Различные транспортные средства и дефектоскоп



Вихревая пелена воздушного винта:  
расчет по теории винта



расчет по теории несущего диска

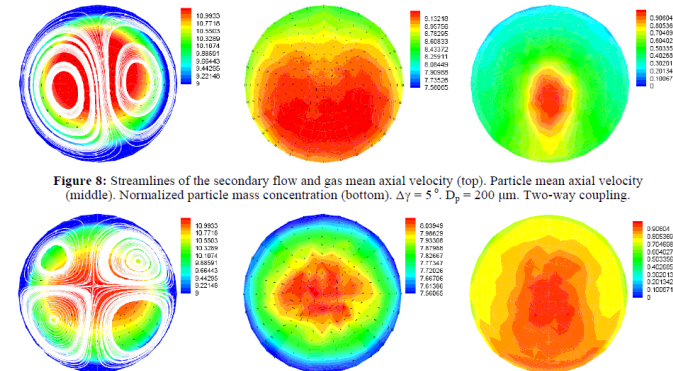
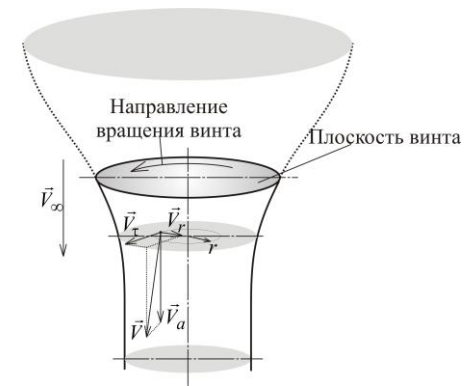


Figure 8: Streamlines of the secondary flow and gas mean axial velocity (top). Particle mean axial velocity (middle). Normalized particle mass concentration (bottom).  $\Delta\gamma = 5^\circ$ ,  $D_p = 200 \mu\text{m}$ . Two-way coupling.

# Диагностический комплекс «Сканлайнер»

## Диагностика дымовых труб с помощью комплекса "СКАНЛАЙНЕР"



Фрагмент съемки внутренней поверхности работающей дымовой трубы (H=100.00 м) коксохимического производства (отм. +35.00 м)



Фрагмент дефекта футеровки работающей дымовой трубы (H=100.00 м) коксохимического производства (отм. +17.00 м)



## Общие характеристики вихрей

| Параметры                     | Вынужденный вихрь (вращение среды как целого) | Свободный (потенциальный) вихрь | Составной вихрь (вихрь Рэнкина)  |
|-------------------------------|---|---------------------------------|--|
| Окружная скорость $W$         | $W = C \cdot r$                               | $W = C/r$                       | $W = C/r \times \left[ 1 - \exp\left[-r^2/r_0^2\right] \right]$        |
| Угловая скорость $\Omega$     | $C$ (постоянная)                              | $C/r^2$ (функция радиуса)       | Функция радиуса  |
| Циркуляция $\Gamma$           | $2\pi \cdot \Omega \cdot r^2$                 | $2\pi \cdot C$                  | $2\pi \cdot C \cdot \left[ 1 - \exp\left[-r^2/r_0^2\right] \right]$    |
| <u>Завихренность</u> $\omega$ | $4\pi \cdot \Omega = \text{const}$            | 0                               | $4\pi \cdot C/r_0^2 \times \left[ \exp\left[-r^2/r_0^2\right] \right]$ |

$$\bar{V}_{y,z}(\bar{y}, \bar{z}) = \frac{1}{\tau_n - \tau_0} \int V_{y,z}(\bar{y}, \bar{z}, \tau) d\tau$$

$$\varepsilon = \text{arctg} \frac{\bar{V}_y}{V_0} = \frac{1}{\tau_n - \tau_0} \int_{\tau_0}^{\tau_n} \text{arctg} \frac{V_y}{V_0}(\bar{y}, \bar{z}, \tau)$$



# Эксперимент. Выбор формы и аэродинамической компоновки зонда.

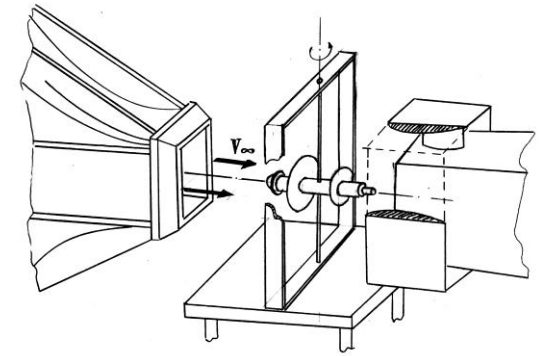
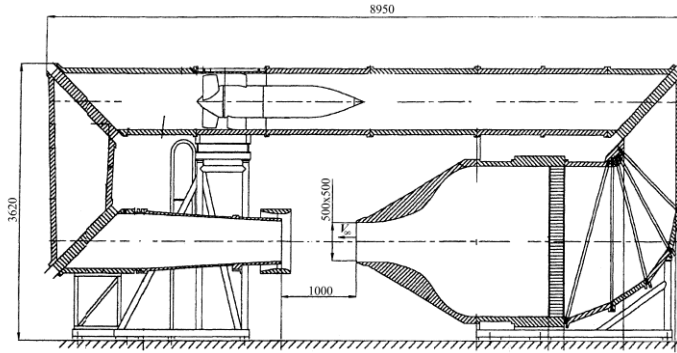
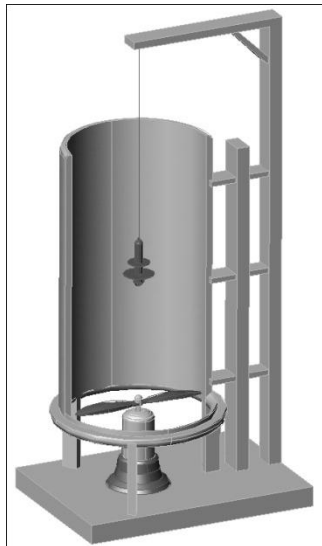
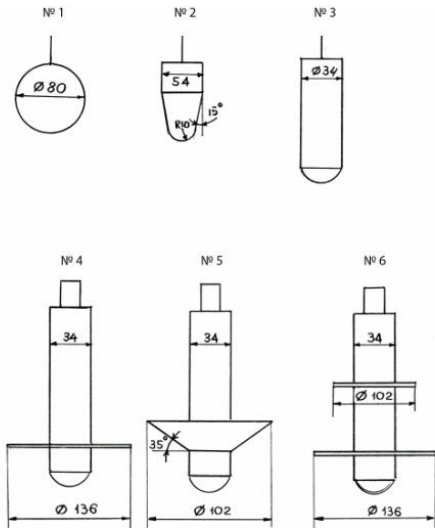


Рис. Дозвуковая труба МГТУ им. Н.Э. Баумана Т-500 и установка свободных колебаний.  $V=22-30$  м/с.  $Re=(2-8) \cdot 10^5$ .

Рис. Установка "Воздуходувка"



| Модель             | 1      | 2      | 3      | 4       | 5       | 6         |
|--------------------|--------|--------|--------|---------|---------|-----------|
| Время раскрытия, с | 40 сек | 38 сек | 45 сек | 240 сек | 120 сек | устойчива |

Рис. Исследуемые модели СА. Длина троса  $l_{\text{трос}} = 0.86$  м

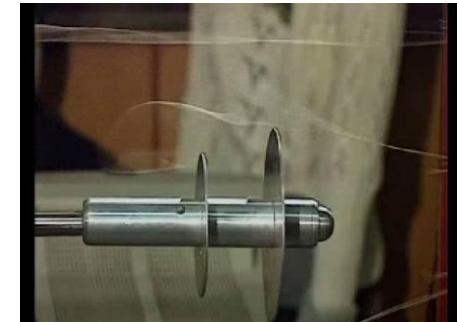
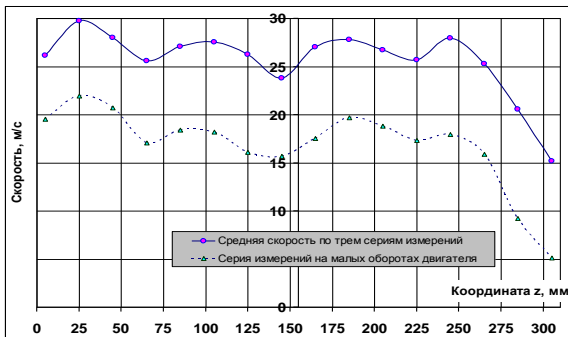
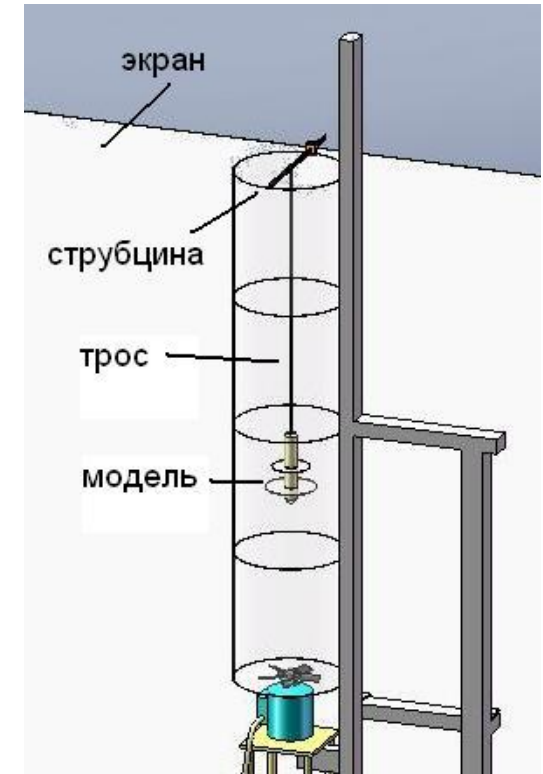
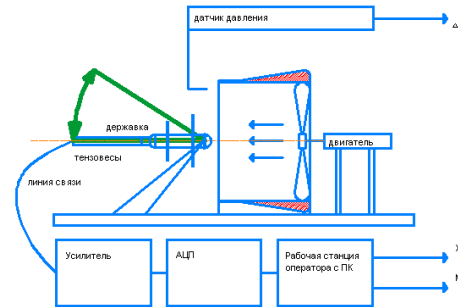
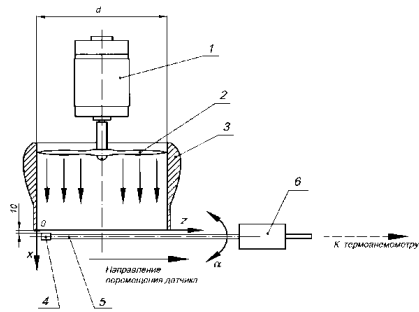
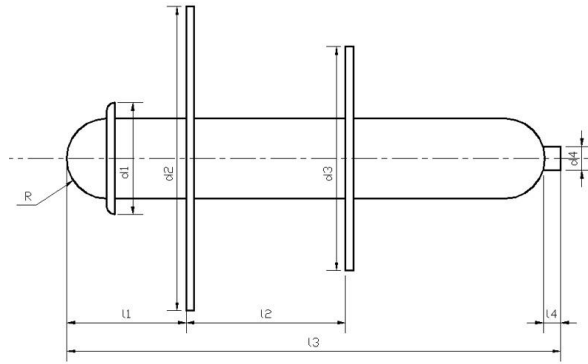
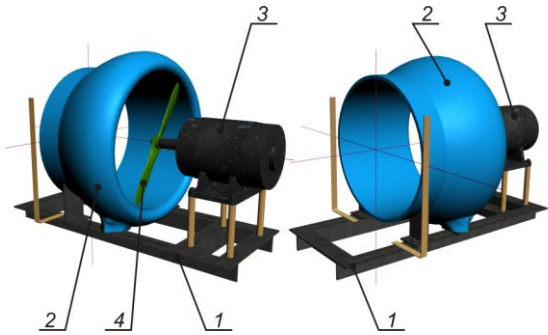


Рис. Визуализация методом шелковинок. Разные моменты времени.

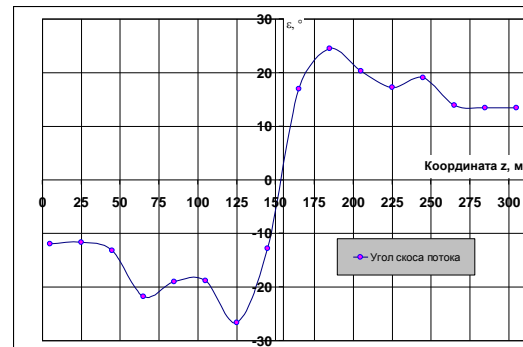
Рис. Экспериментальные модели



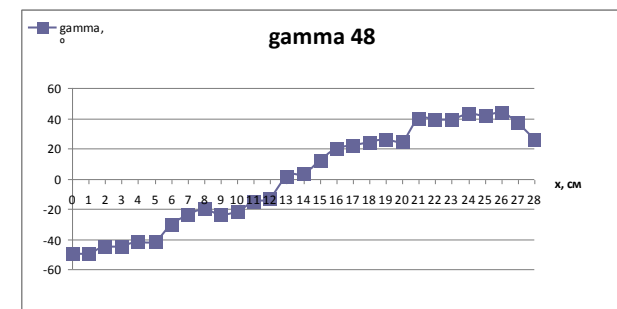
# Проведение эксперимента в установке «винт-кольцо» (закрученный поток)



Скорость



Угол скоса потока



Угол скоса потока

# Численное моделирование

## Свободное программное обеспечение

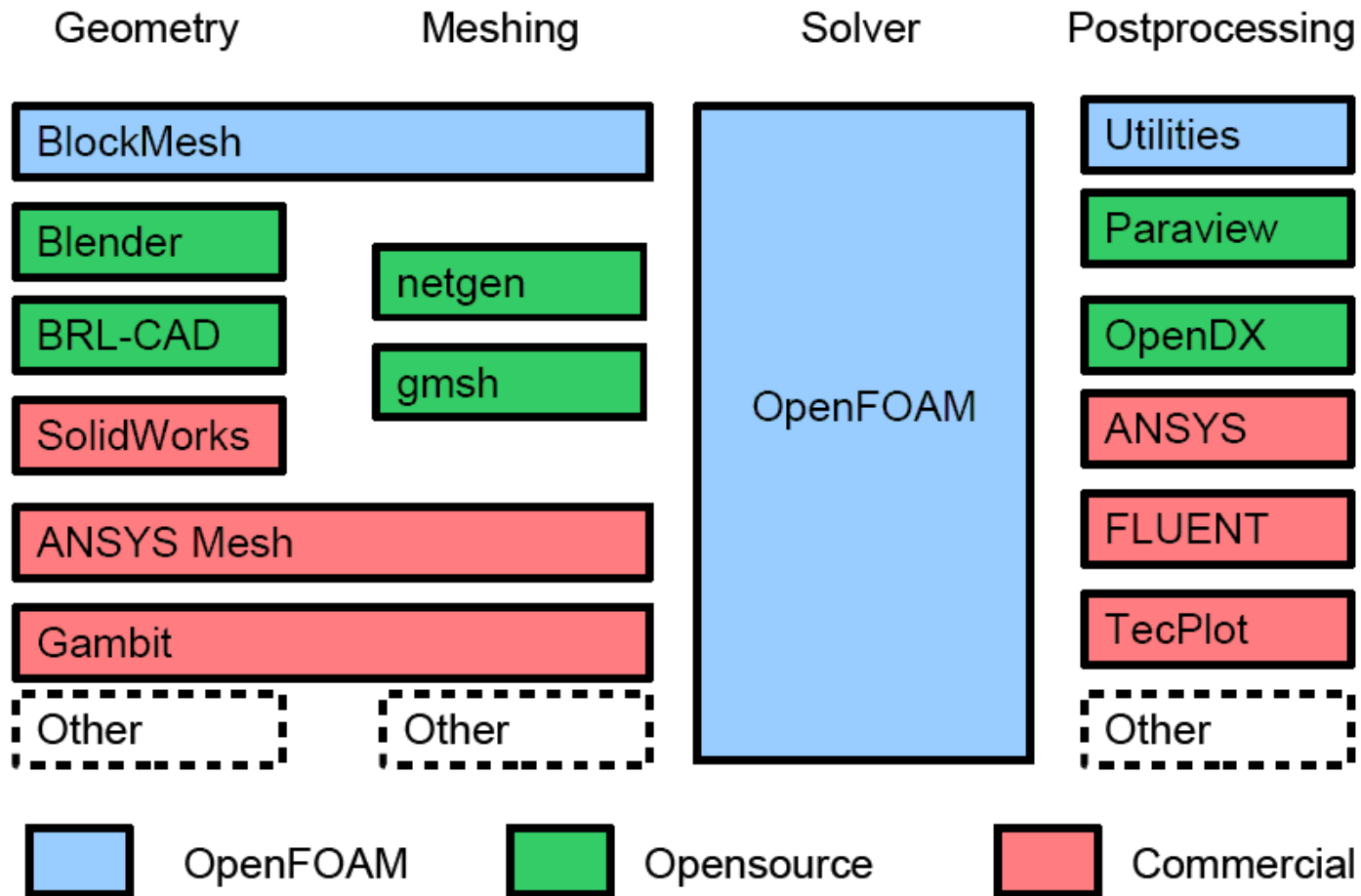


Рис. Основные этапы создания расчетной модели. Использование ресурсов Web лаборатории UniHUB ([www.unihub.ru](http://www.unihub.ru)). Расчет на вычислительном кластере.

# Математическая модель расчета параметров течения - URANS

## Обобщенное уравнение, отражающее законы сохранения и модель турбулентности, в интегральной форме

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \rho \phi \, d\Omega + \int_{\Omega} \rho \phi \vec{V} \cdot \vec{n} \, dS = \int_S \Gamma \, \text{grad} \phi \cdot \vec{n} \, dS + \int_{\Omega} q_{\phi} \, d\Omega$$

Здесь  $\phi$  - обобщенная переменная  $\phi = \{1, u, v, w, k, \omega, h\}$   $\Omega$  - контрольный объем,

$\vec{V}$  - вектор скорости,  $\Gamma$  - коэффициенты переноса,  $\vec{n}$  - вектор нормали

$dS$  - Дифференциальный элемент площади

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i k)}{\partial x_i} = \tilde{P}_k - \beta^* \rho k \omega + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ (\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] \quad \text{Модель k-omega SST Ментера}$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i \omega)}{\partial x_i} = \alpha \rho S^2 - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ (\mu + \sigma_{\omega} \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \right] + 2(1 - F_1) \rho \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i}$$

$$\frac{\partial(\rho \tilde{v})}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \tilde{v} u_j) = \frac{1}{\sigma_{\tilde{v}}} \left\{ \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu + \rho \tilde{v}) \frac{\partial \tilde{v}}{\partial x_j} \right] + C_{b2} \rho \left( \frac{\partial \tilde{v}}{\partial x_j} \right)^2 \right\} + G_v - Y_v; \quad \text{Модель Спаларта-Аллмараса}$$

$\rho, u, p, k, \omega, h, t, \mu$  - плотность, скорость, давление, кинетическая энергия турбулентности, скорость диссипации энергии, энтальпия, время, динамическая вязкость

# Математическая модель расчета параметров течения - LES

$$u = \bar{u} + \bar{u}' \quad \bar{u} = \int_D G(\zeta, \Delta) u(\zeta, t) d^3 \zeta$$

$$\Delta = V^{1/3} = (\Delta x \Delta y \Delta z)^{1/3}$$

$$\partial_t \bar{u} + \nabla \cdot (\bar{u} \otimes \bar{u}) = \nabla \cdot (\bar{S} - B); \quad S = -pI + 2\nu D$$

$$D = 0.5(\nabla u + \nabla u^T); \quad B = L + C + R$$

Дифференциальное уравнение для подсеточной кинетической энергии

$$\frac{\partial \bar{K}}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{K} \bar{U}) = \nabla \cdot [(\nu + \nu_{SGS}) \cdot \nabla \bar{K}] - \bar{\varepsilon} - \tau \cdot \bar{S}$$



# Возможности OpenFOAM для моделирования закрученного течения

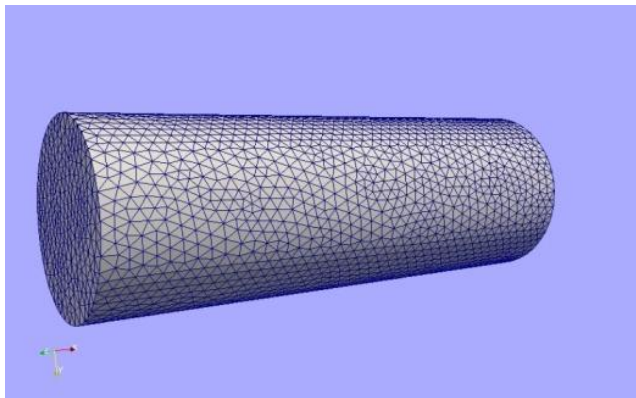
- URANS и LES
- pisoFoam & rhoPisoFoam
- addSwirlAndRotation – утилита
- Модификация k-omega SST модели с учетом кривизны линии тока (AIAA Journal. 2000. Shur & Spalart)
- LES: inlet : Synthesised turbulence method
- LES: inlet : Mapped back method
- Модификация LES: inlet : Mapped back method (Virtual axial and body azimuthal body forces. Computers & Fluids.38.2009. Baba-Ahmadi, Tabor)

$$\partial_t \bar{u} + \nabla \cdot (\bar{u} \otimes \bar{u}) = \nabla \cdot (\bar{S} - B) + \bar{F}$$

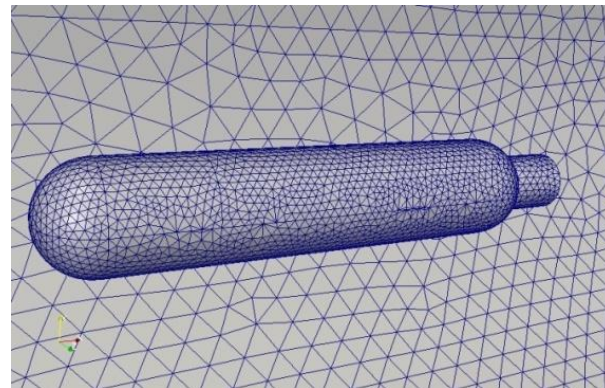
- Launder-Reece-Rodi RSTM
- Launder-Gibson RSTM with wall-reflection terms

# Математическая модель расчета обтекания аппарата-зонда.

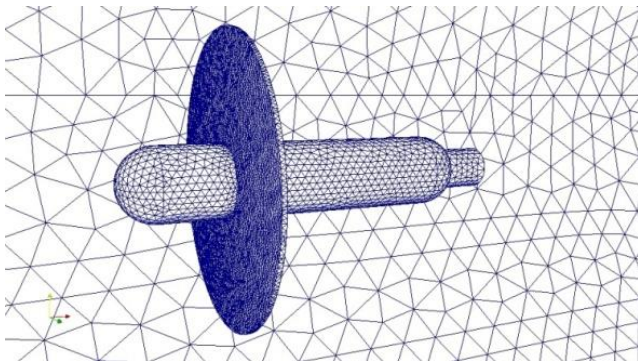
## Постановка задачи. Исследуемые тела.



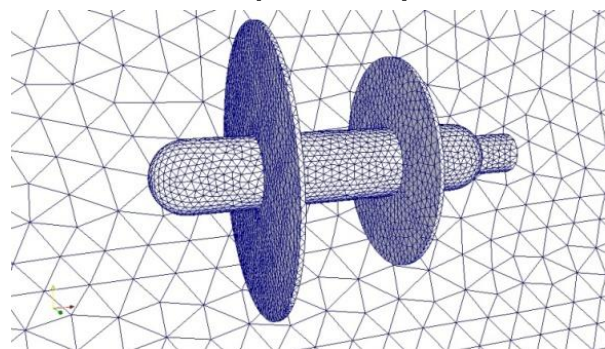
Расчетная область



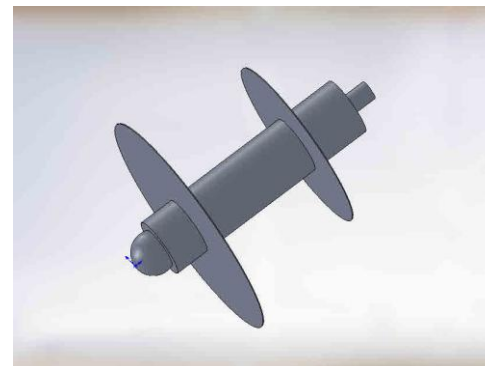
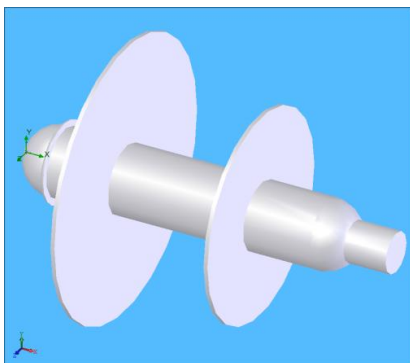
Цилиндр



Цилиндр с одним диском



Цилиндр с двумя диском



# Расчет АДХ. Сравнение. T=1 секунда.

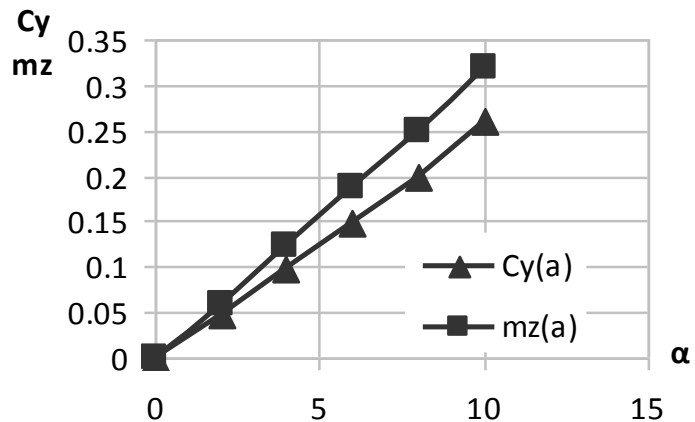


Рис. Зависимость АДХ для цилиндра

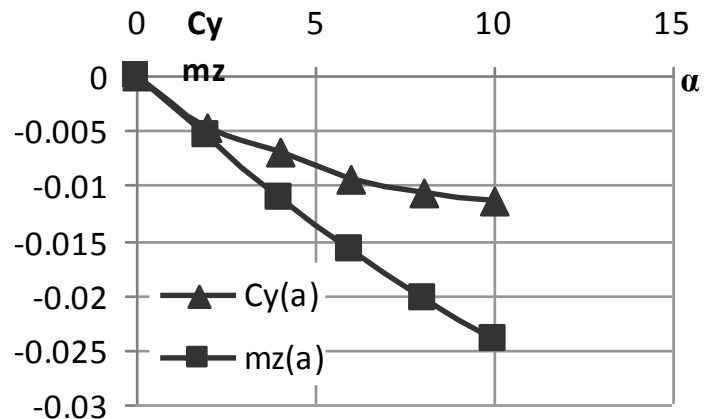


Рис. Значения АДХ для цилиндра с двумя дисками

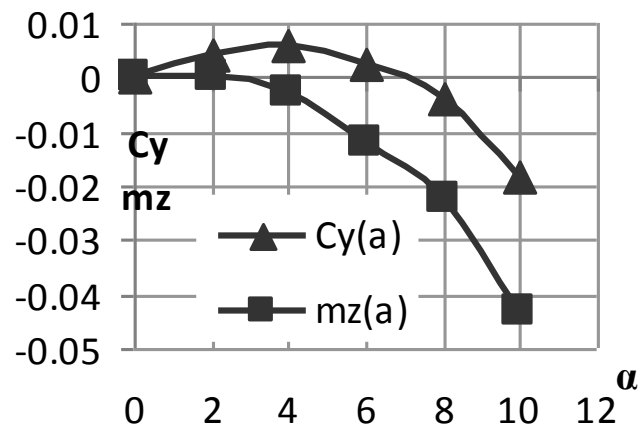


Рис. Зависимость АДХ для цилиндра с одним диском

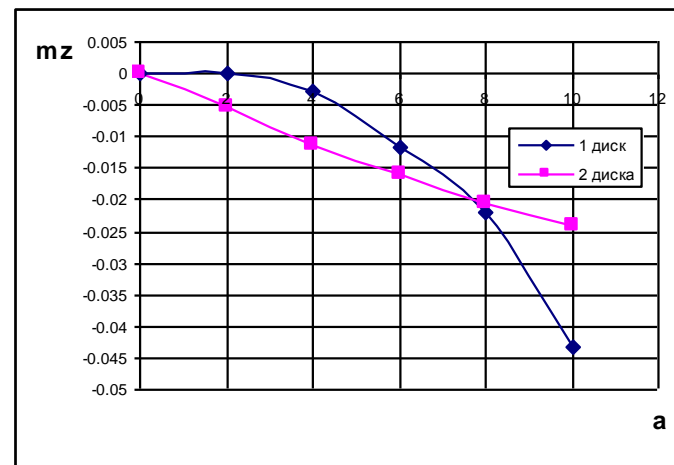
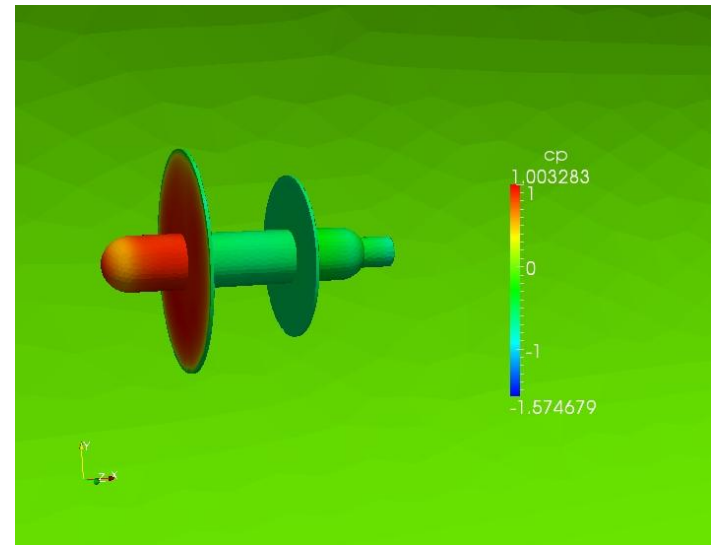
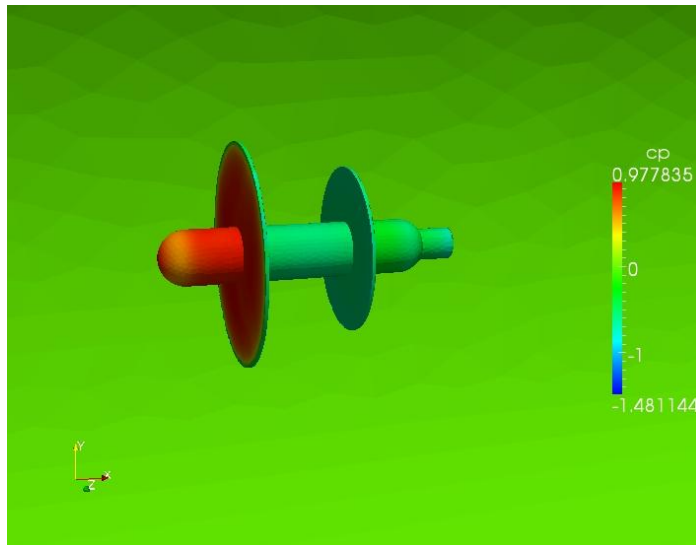
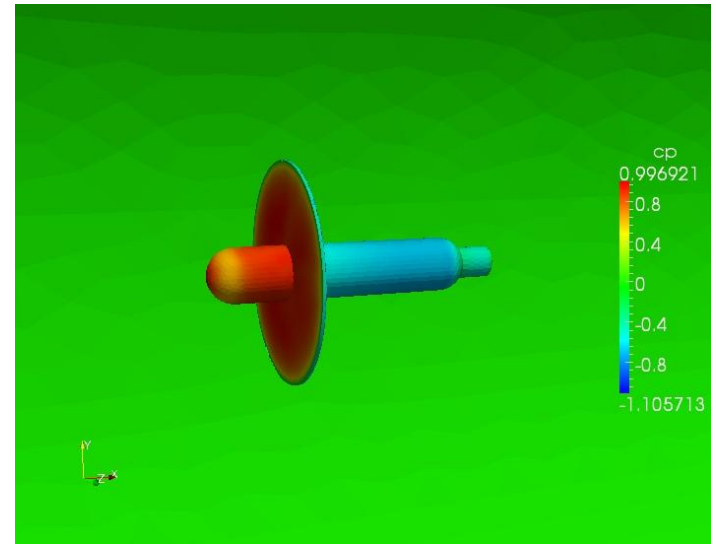
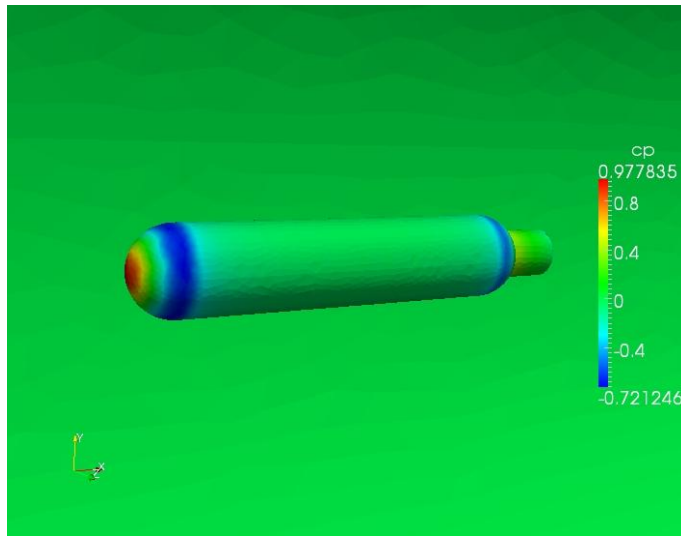


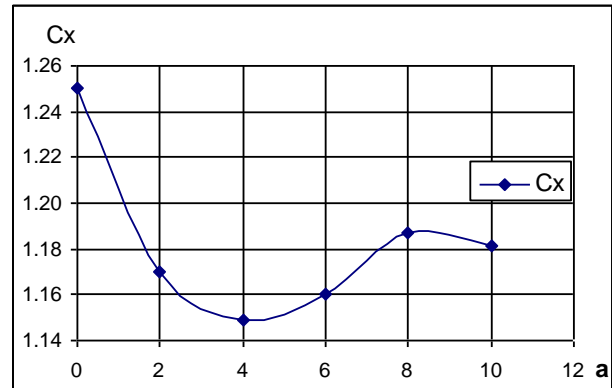
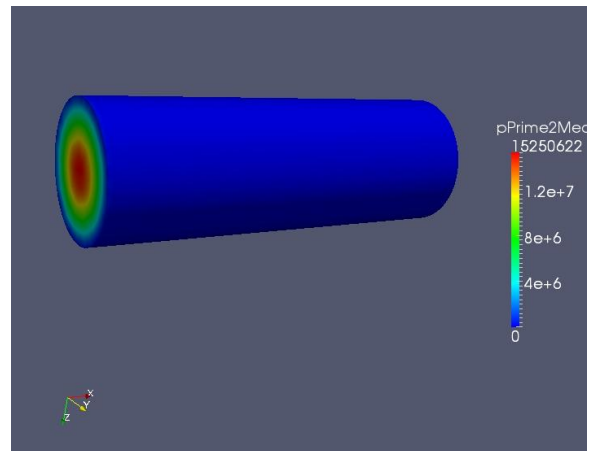
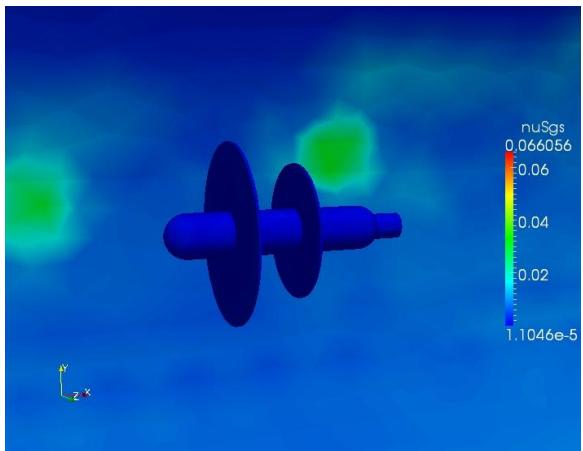
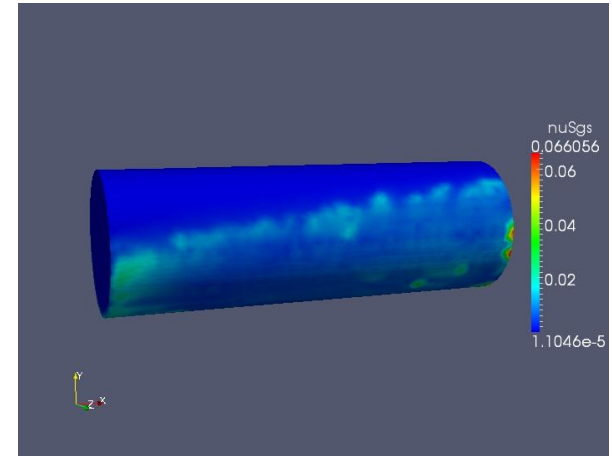
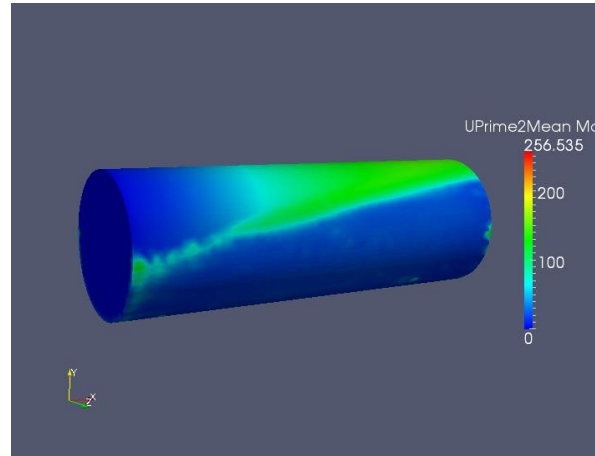
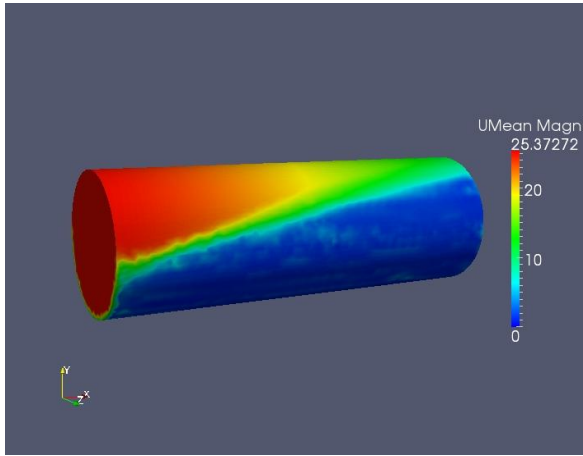
Рис. Значения  $mz$  от угла атаки для разных тел

# Коэффициент давления $C_p$

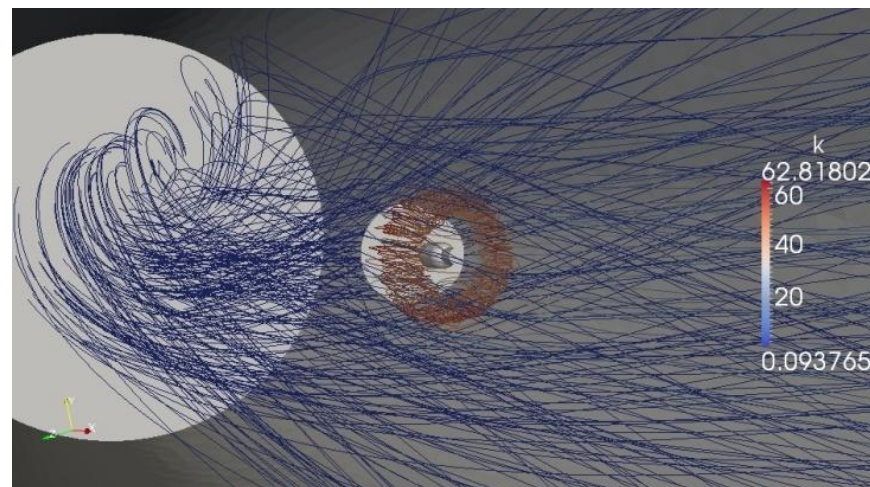
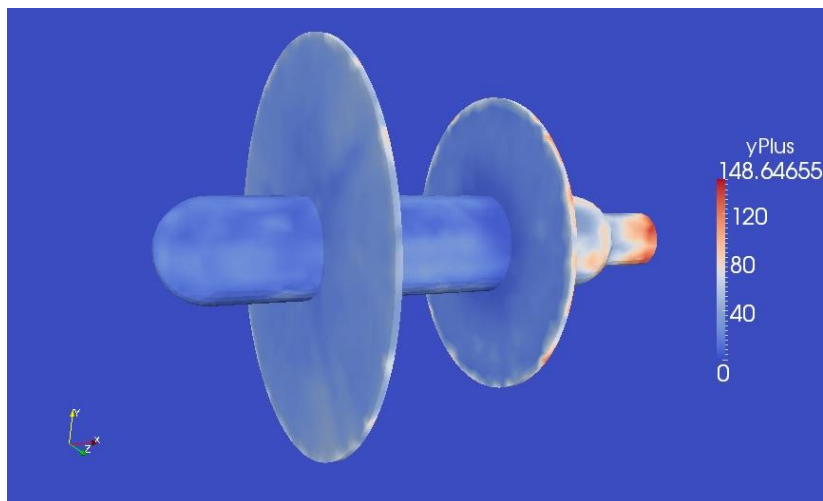
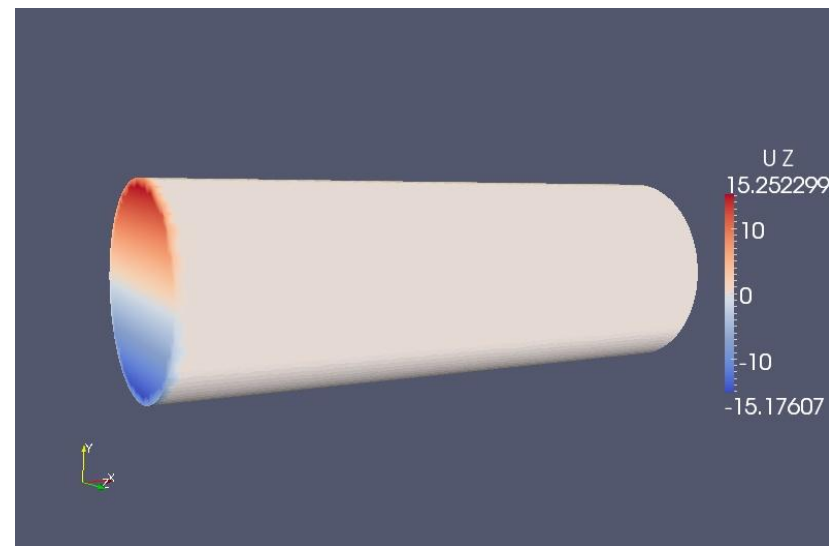
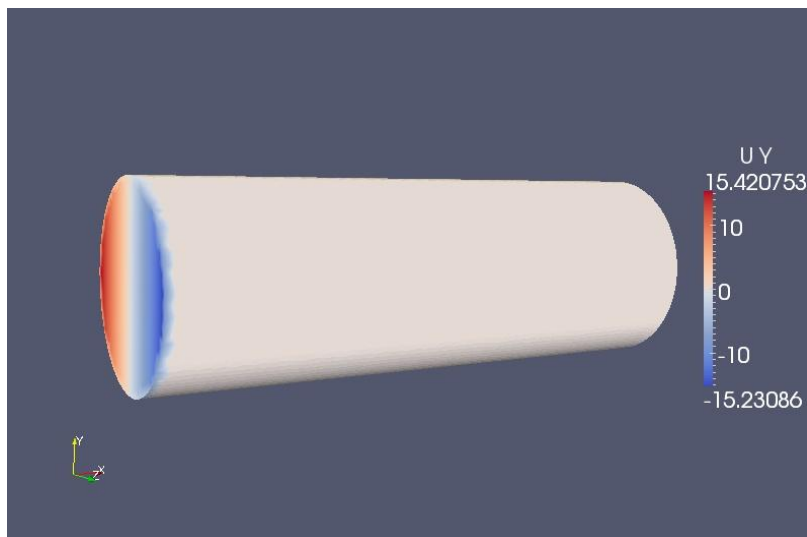




# LES – Модель крупных вихрей



Расчет течения с закруткой по закону твердого тела. Различные значения угловой скорости потока. Внедрение нового гр. условия.



# Расчет течения с закруткой. $T=2$ сек.



Рис. Значения турбулентной вязкости.

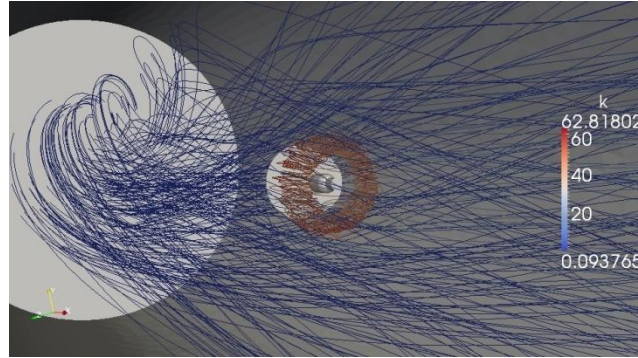


Рис. Значения энергии турбулентной

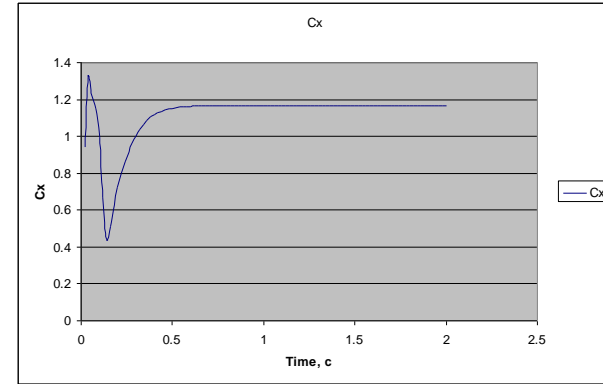


Рис. Зависимость  $C_x$  от  $t$

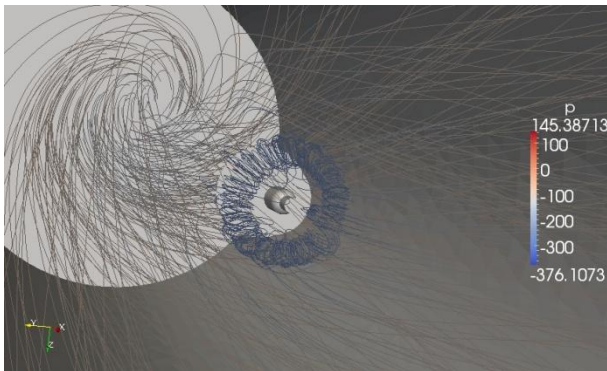


Рис. Значения давления

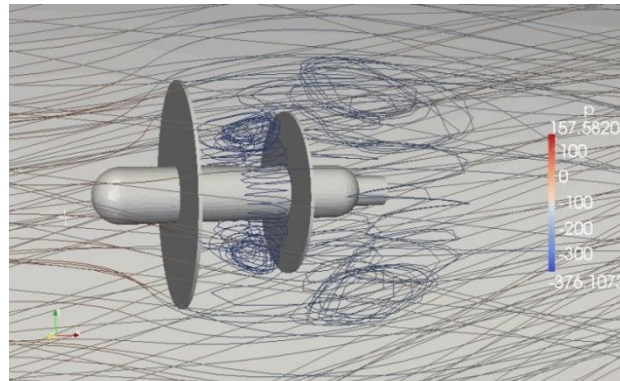


Рис. Линии тока

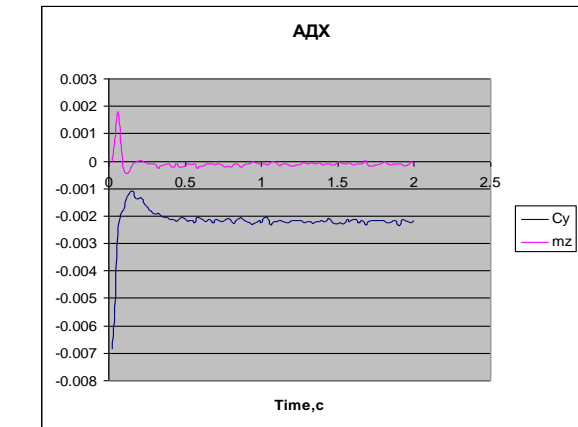
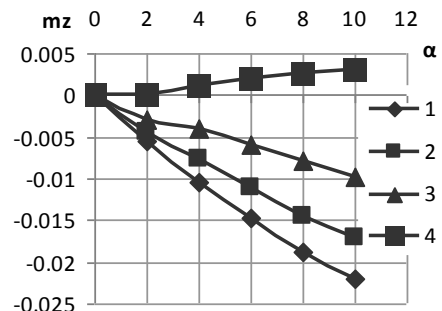
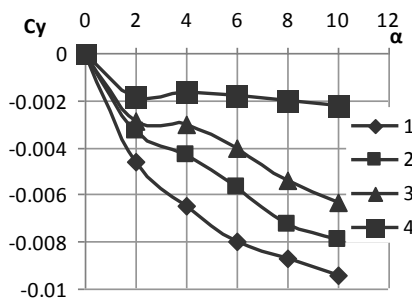
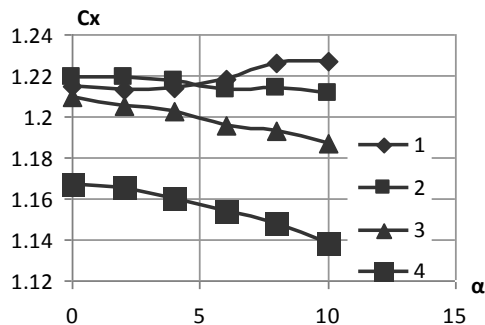
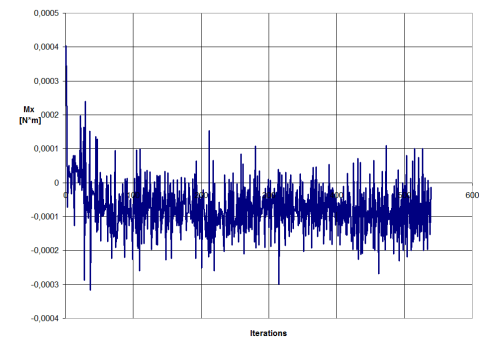
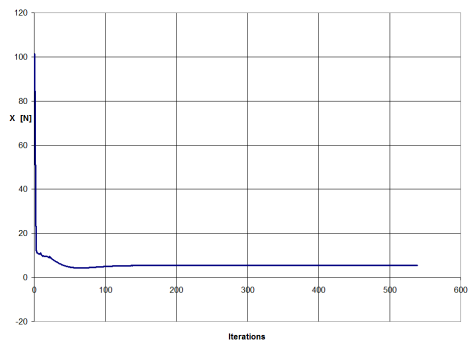
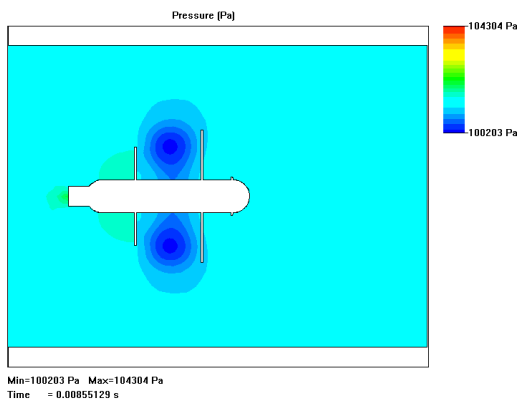
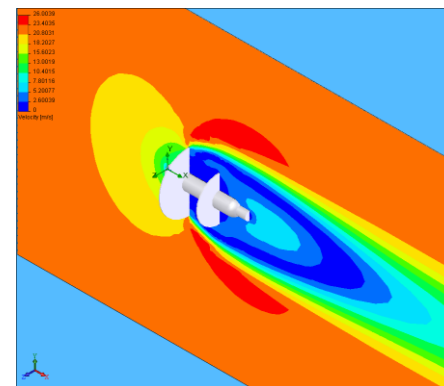
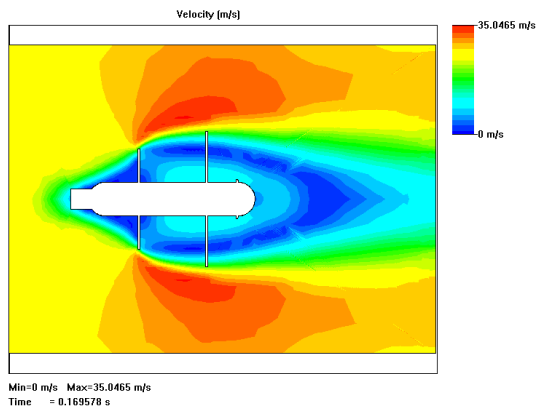
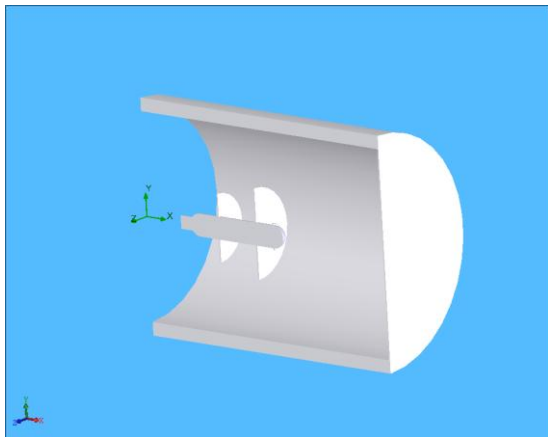


Рис. Зависимость  $C_y, m_z$  от  $t$



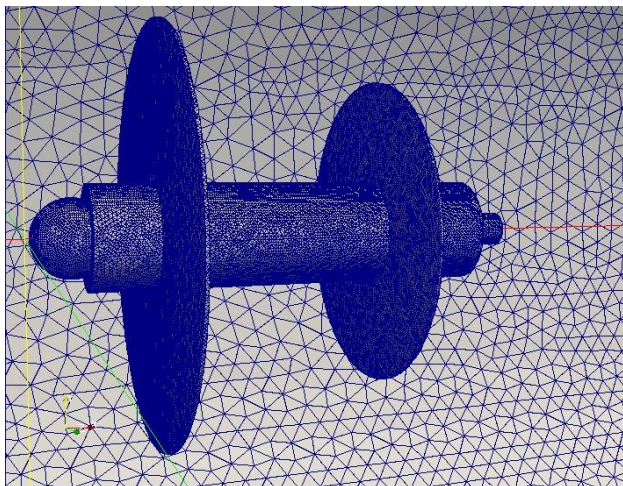
- 1 – 3 рад/с
- 2 - 10 рад/с
- 3 - 16 рад/с
- 4 – 24 рад/с

# Расчет течения с закруткой в установке «винт-кольцо». T=1 сек.

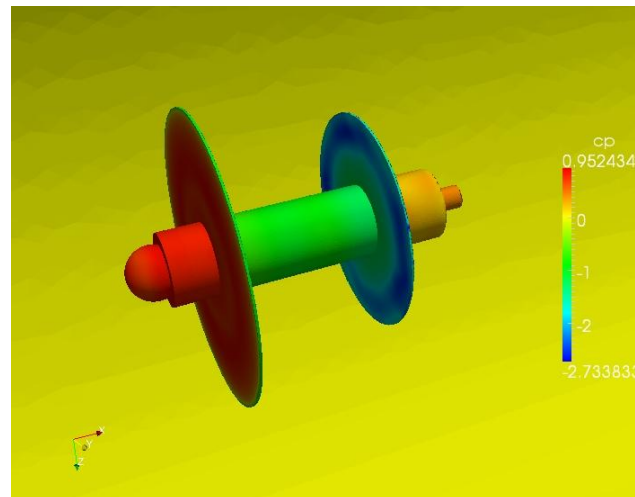




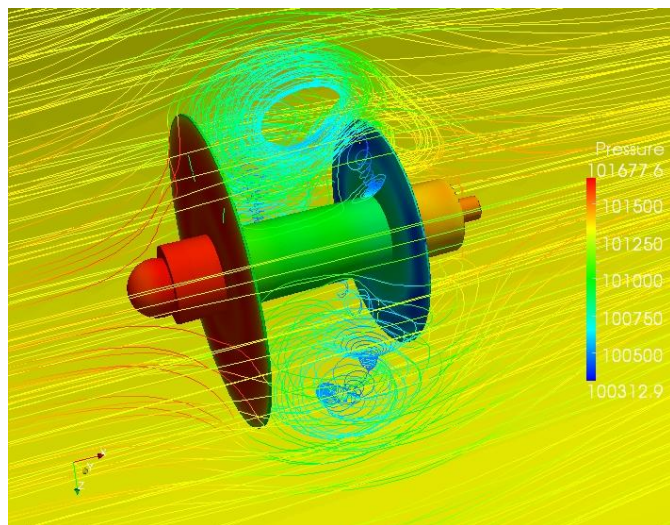
# Расчет обтекания аппарата «Сканлайнер». Модель М 1:1.



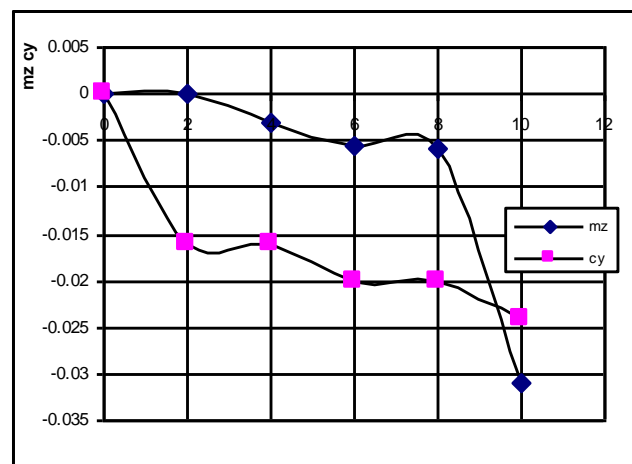
Расчетная сетка. 4 млн.



Коэффициент давления

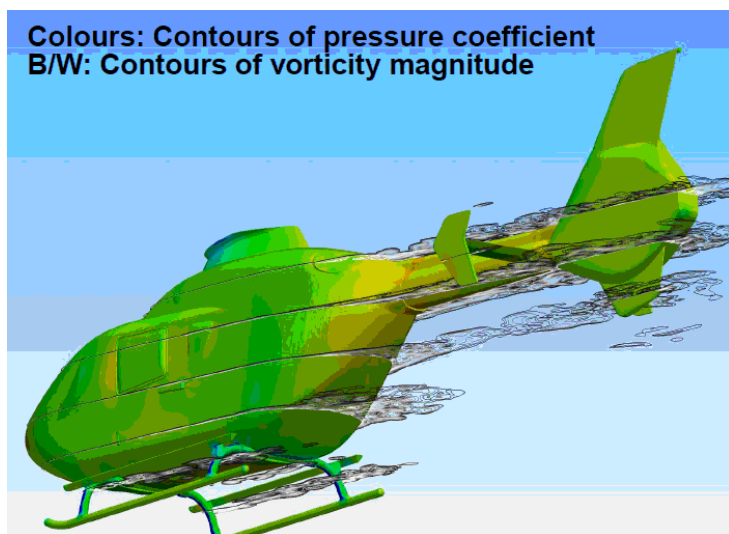
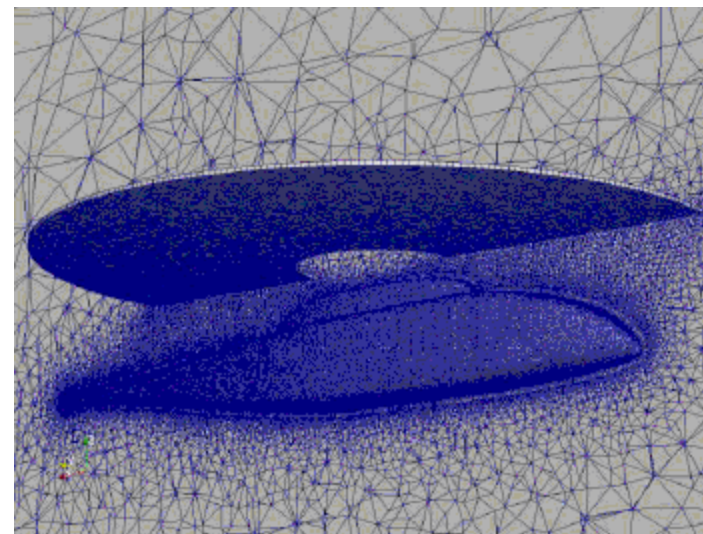
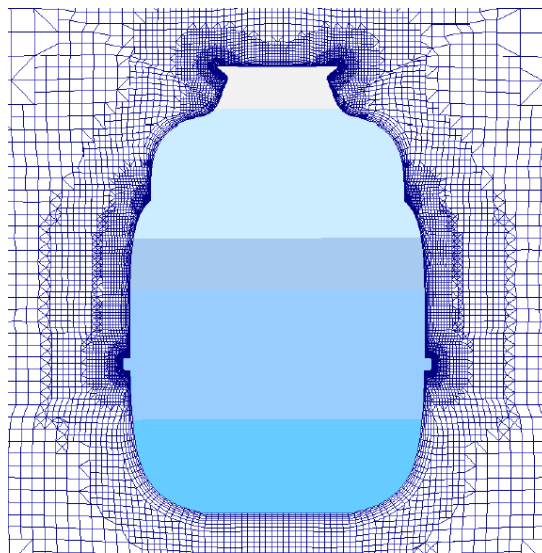
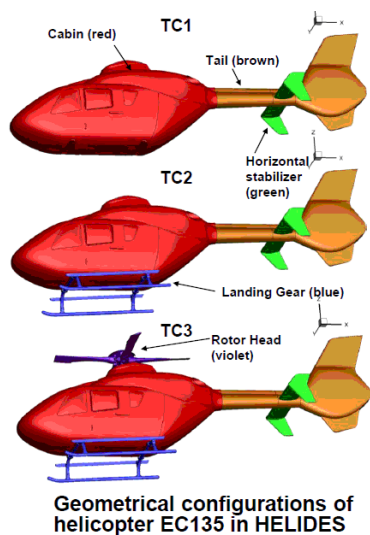


Давление

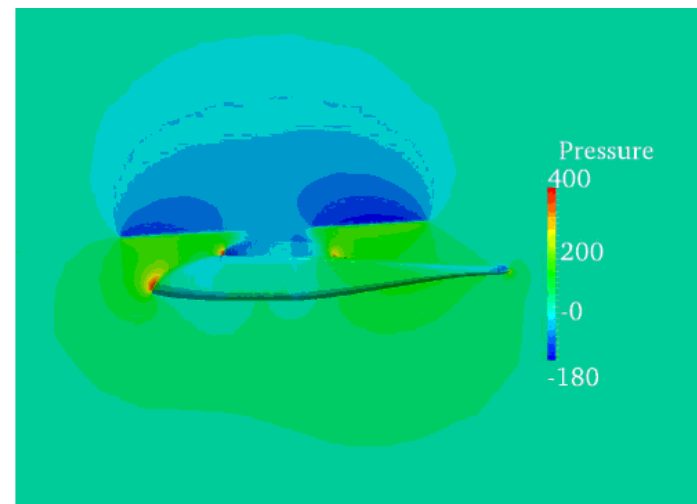


Зависимости  $m_z$ ,  $c_y$

# Расчет обтекания фюзеляжа вертолета



TUB & Eurocopter GmbH. Clean Sky. 2012.  
HELIDES. SA-DDES. 38 M cells. 128 cores.



PNU. 2012. BET + CFD.

# Заключение

- OpenFoam предоставляет широкие возможности для моделирования закрученных турбулентных течений
- Необходимо обращать внимание на задание граничных условий и выбор сетки
- Существуют возможности расширения встроенных моделей турбулентности