



САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ МОРСКОЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Использование высокопроизводительных вычислений в задачах гидродинамики

А.О. Дукарский, И.В. Ткаченко, Н.В. Тряскин, С.И. Чепурко

Введение

Задачи корабельной гидродинамики:

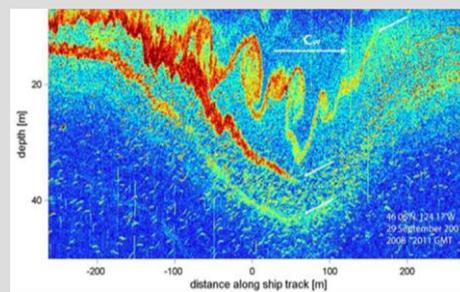
- Внутренняя задача (течения в корабельных системах и емкостях);
- Внешняя задача (обтекание тел);
- Волновые движения жидкости (поверхностные и внутренние волны, качка);
- Геофизические течения.



Введение

Особенности задач корабельной гидродинамики:

- Большие геометрические размеры -> высокие числа Рейнольдса -> тонкий пограничный слой -> высокое сеточное разрешение (40-160 млн. ячеек);
- Кавитация;
- Свободная поверхность;
- Геофизические процессы;
- Ледовые условия.



Вычислительные аспекты

Математические модели:

Уравнения Навье-Стокса или их осредненные аналоги;

Уравнение переноса безразмерной плотности
(стратифицированные течения);

URANS, LES модели турбулентности;

Volume of Fluid (VoF) метод.

Сервисы:

SALOME;

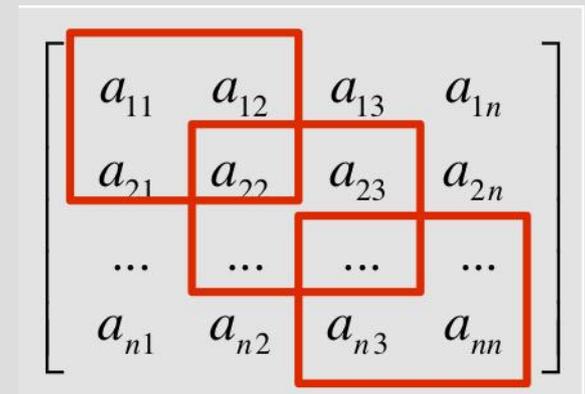
OpenFOAM;

ParaFOAM;

FlowFES (домашний).

Вычислительные ресурсы:

UniCluster-SMTU, UniHUB.



Опыт использования высокопроизводительных вычислений в задачах судостроения

В учебном процессе:

Лабораторные работы;
Курсовые работы;
Дипломное проектирование (8).

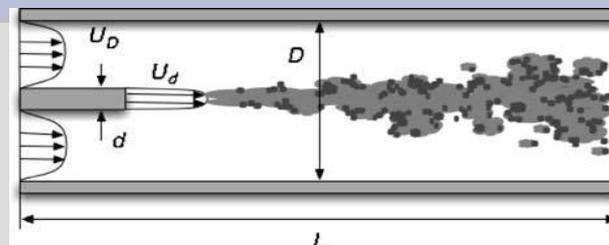
В научных исследованиях:

Подготовка кандидатских (4) и докторских диссертаций (1);
Выполнение НИР и НИОКР;
Совместные исследования с партнерами: ИСП РАН, РНЦ КИ,
КГНЦ, ИО РАН, ИПФ РАН, МГУ, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
СПбГПУ, ВМПИ.

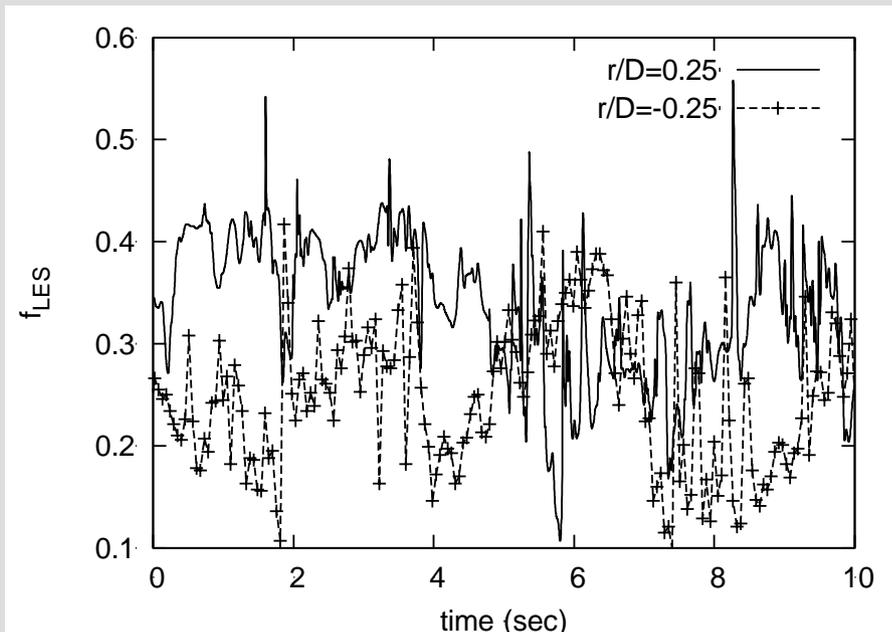
Моделирование течений в корабельных системах и емкостях

Однородное струйное течение в канале смесителя

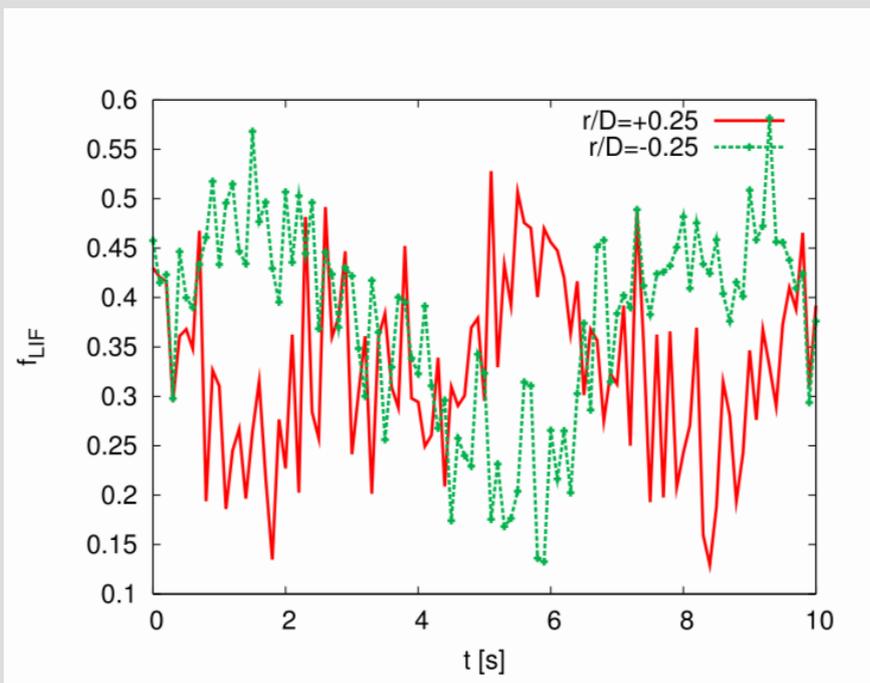
ГУ: профиль скорости + ГСЧ, ПФ, давление на выходе



Эволюция во времени коэффициента смеси в точках $x/D = 1.6$ $r/D = 0.25$ $q = 0$; ρ $Re_d = 10^4$



Расчет



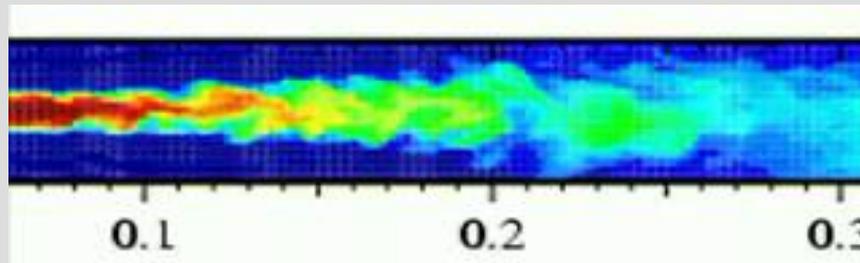
Эксперимент

Однородное струйное течение в канале смесителя

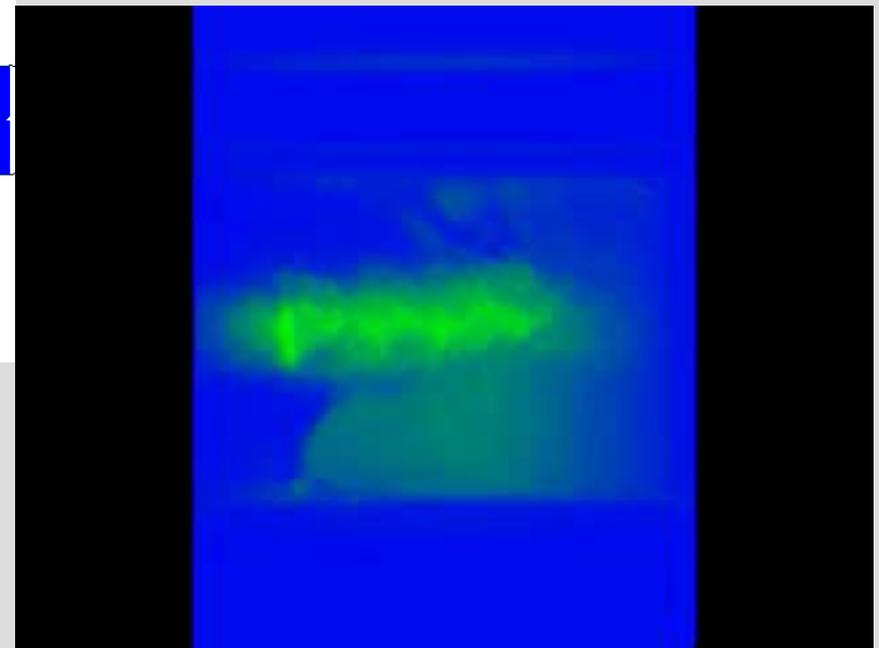
Нестационарный расчет. URANS, SST модель



LES, DSM модель



LIF



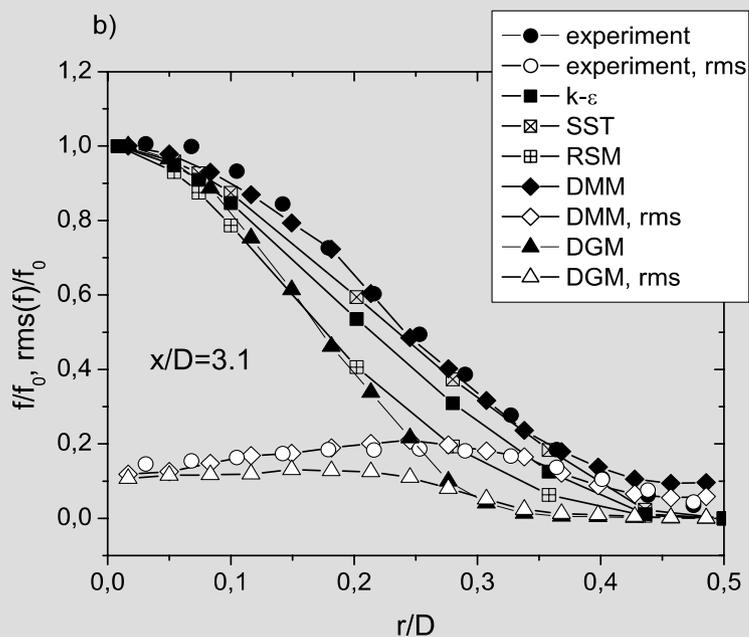
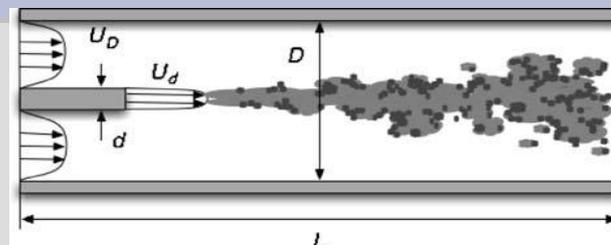
URANS подход не позволяет воспроизвести нестационарную картину течения, наблюдаемую в эксперименте. LES расчеты хорошо согласуются с экспериментом (локальные характеристики и топология течения)

Однородное струйное течение в канале смесителя

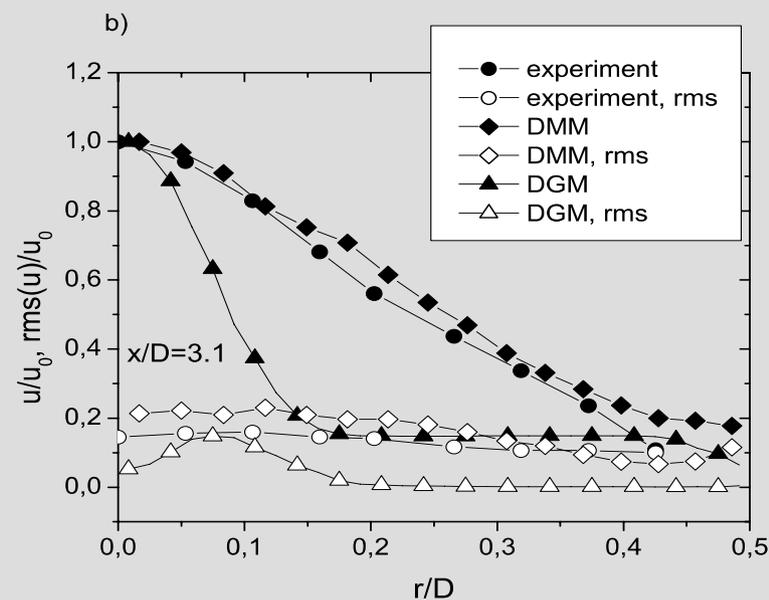
Оценка моделей турбулентности

Профили осредненной величины и среднеквадратичной пульсации

$x/D = 3.1$ $Re_d = 10^4$



Коэффициент смеси

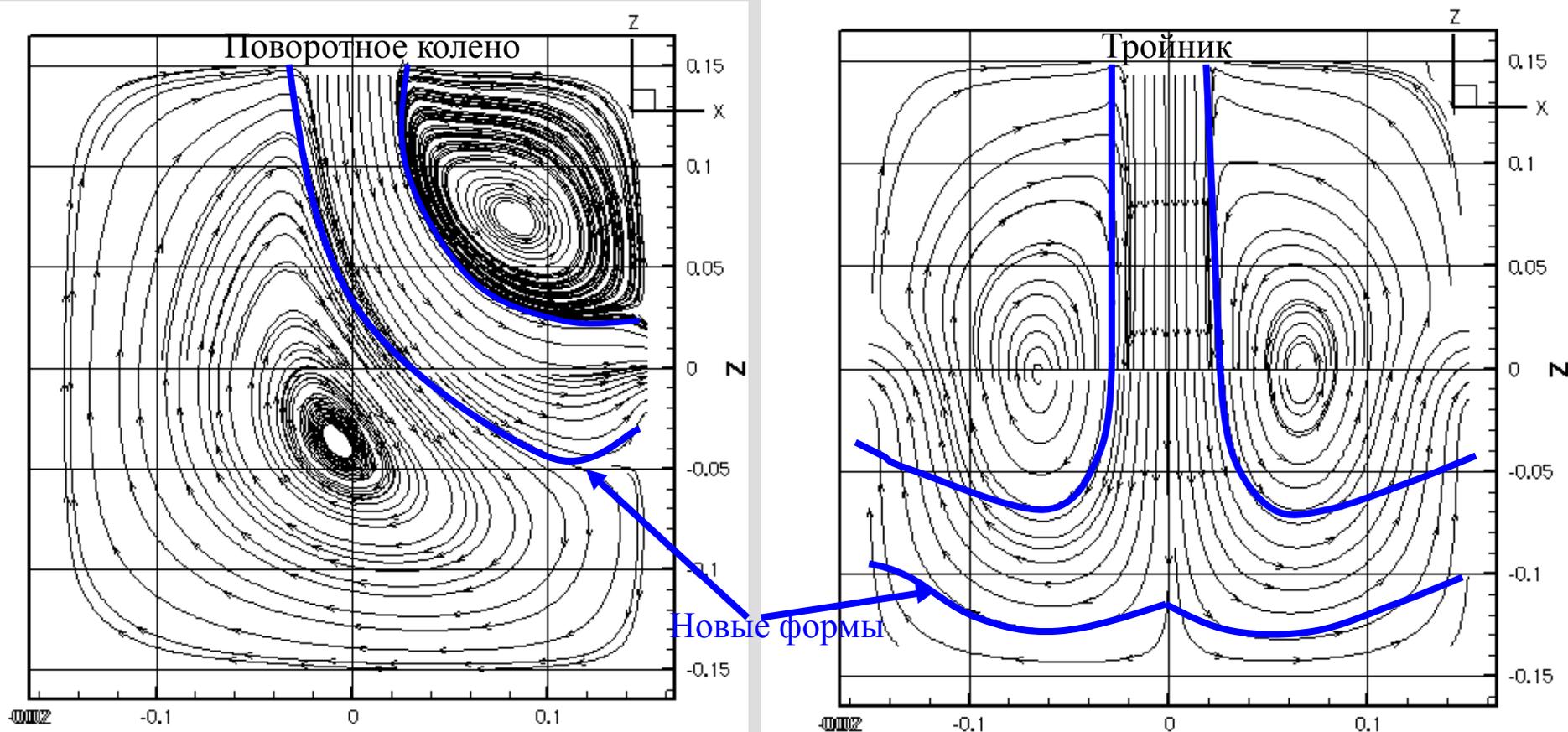


Аксиальная компонента скорости

Оптимизация фасонных элементов судовых систем

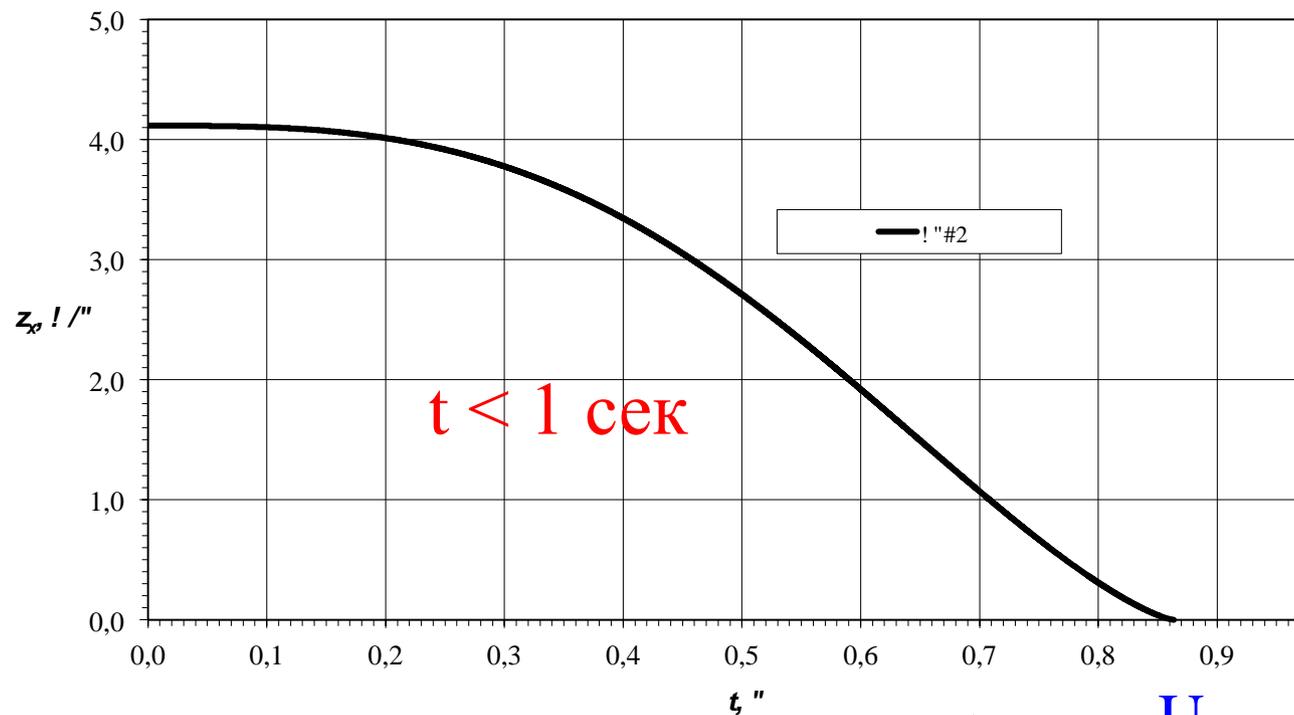
Поворотное колено и тройник

к-ε модель

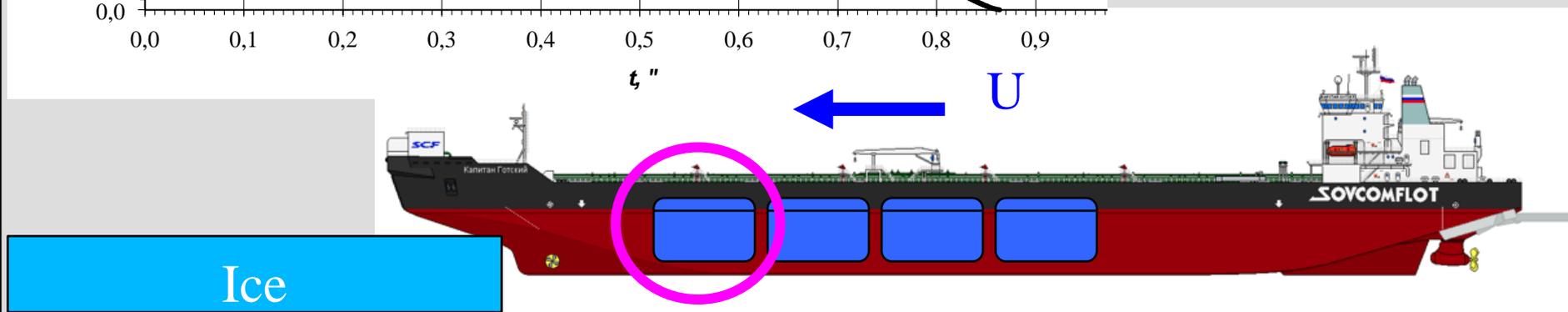


Создание новых форм фасонных элементов

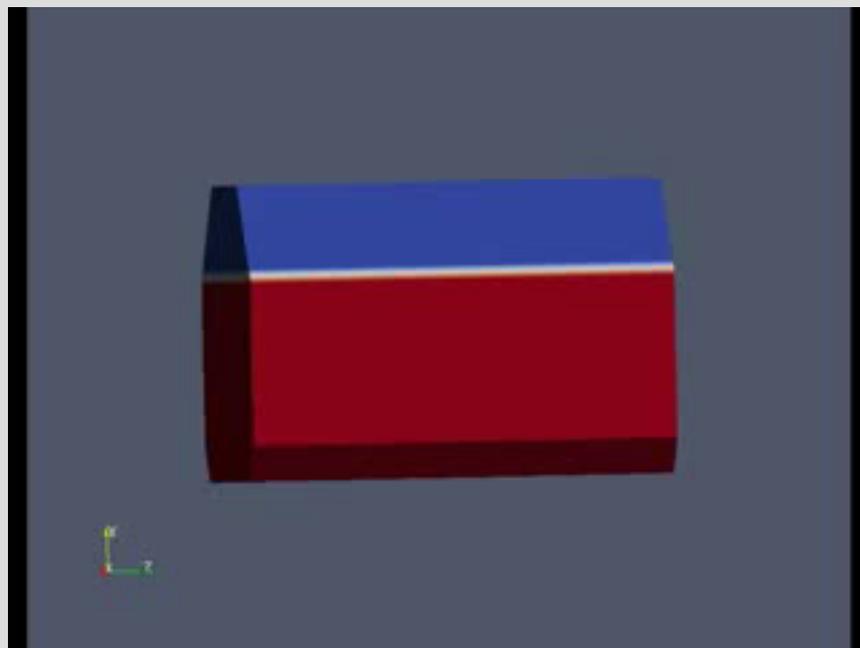
Колебания жидкости в танке при соударении судна со льдом



Изменение скорости движения судна

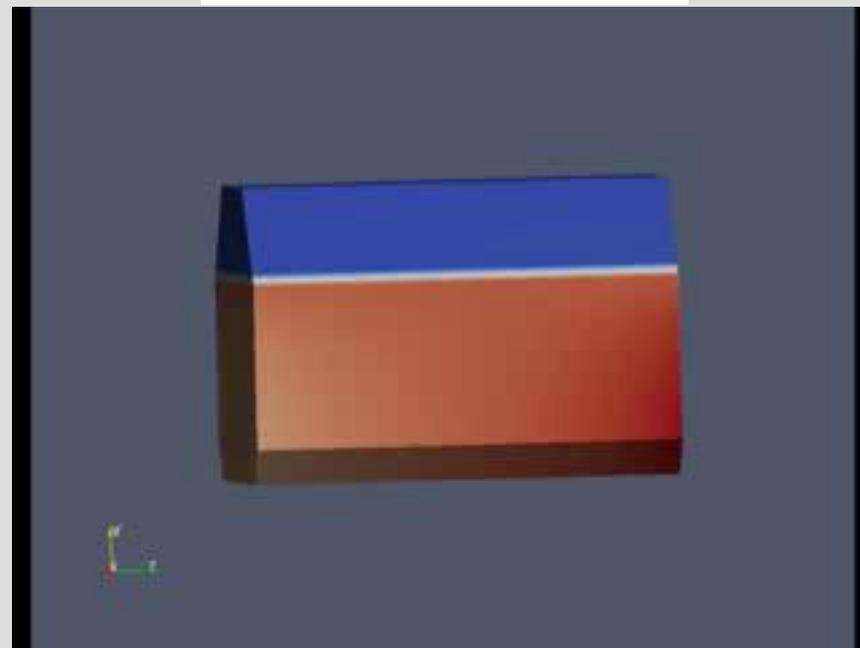
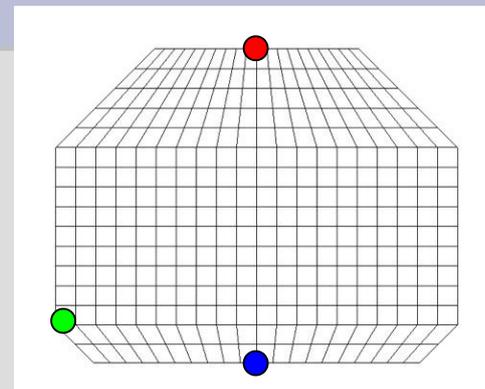


Колебания жидкости в танке при соударении судна со льдом

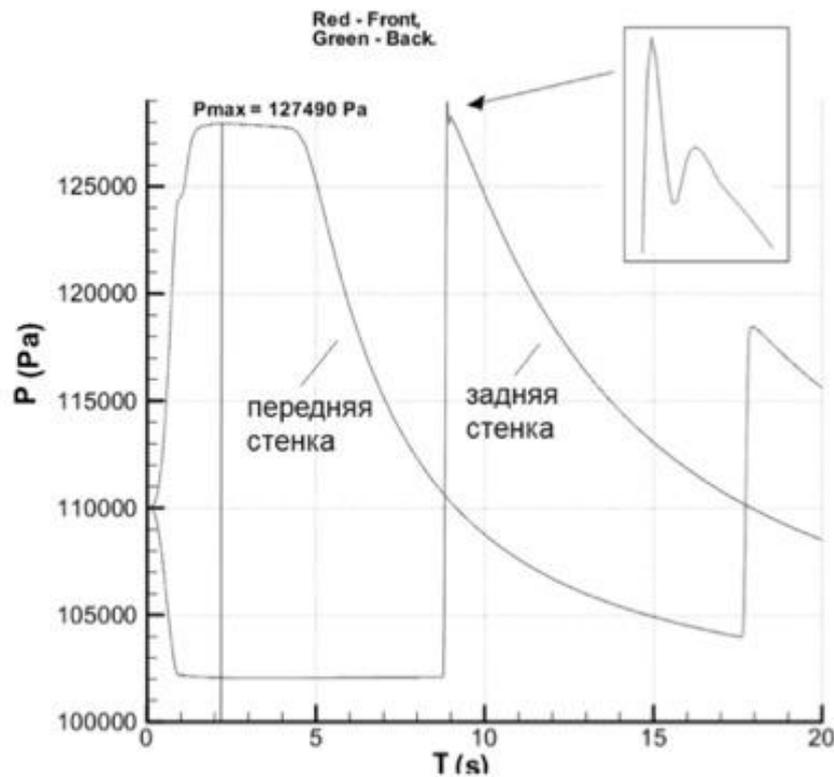


Эволюция уровня
сжиженного газа

Распределение давления
на стенках танка

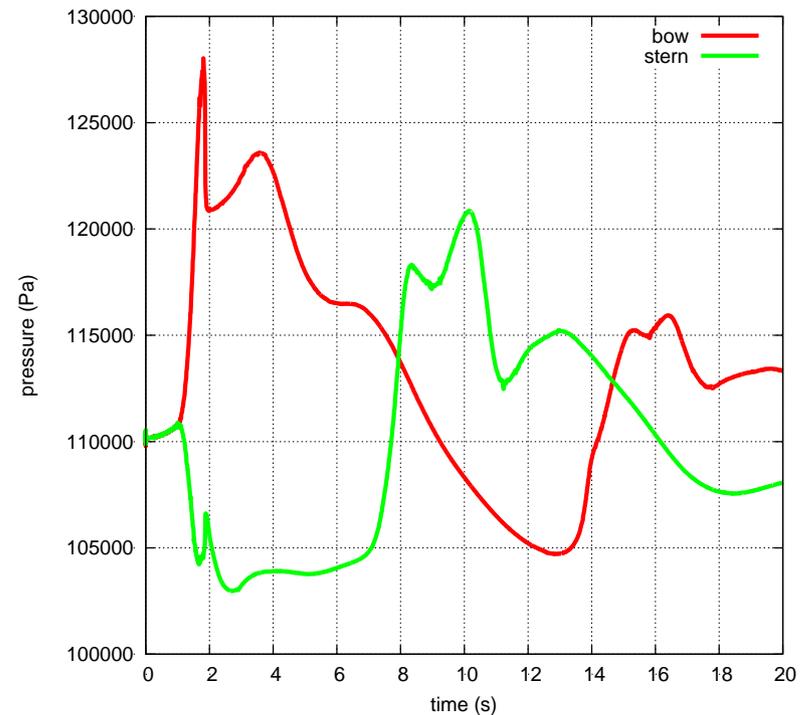


Колебания жидкости в танке при соударении судна со льдом



Shallow water equations

Elizarova T.G.¹, Saburin D.S.²



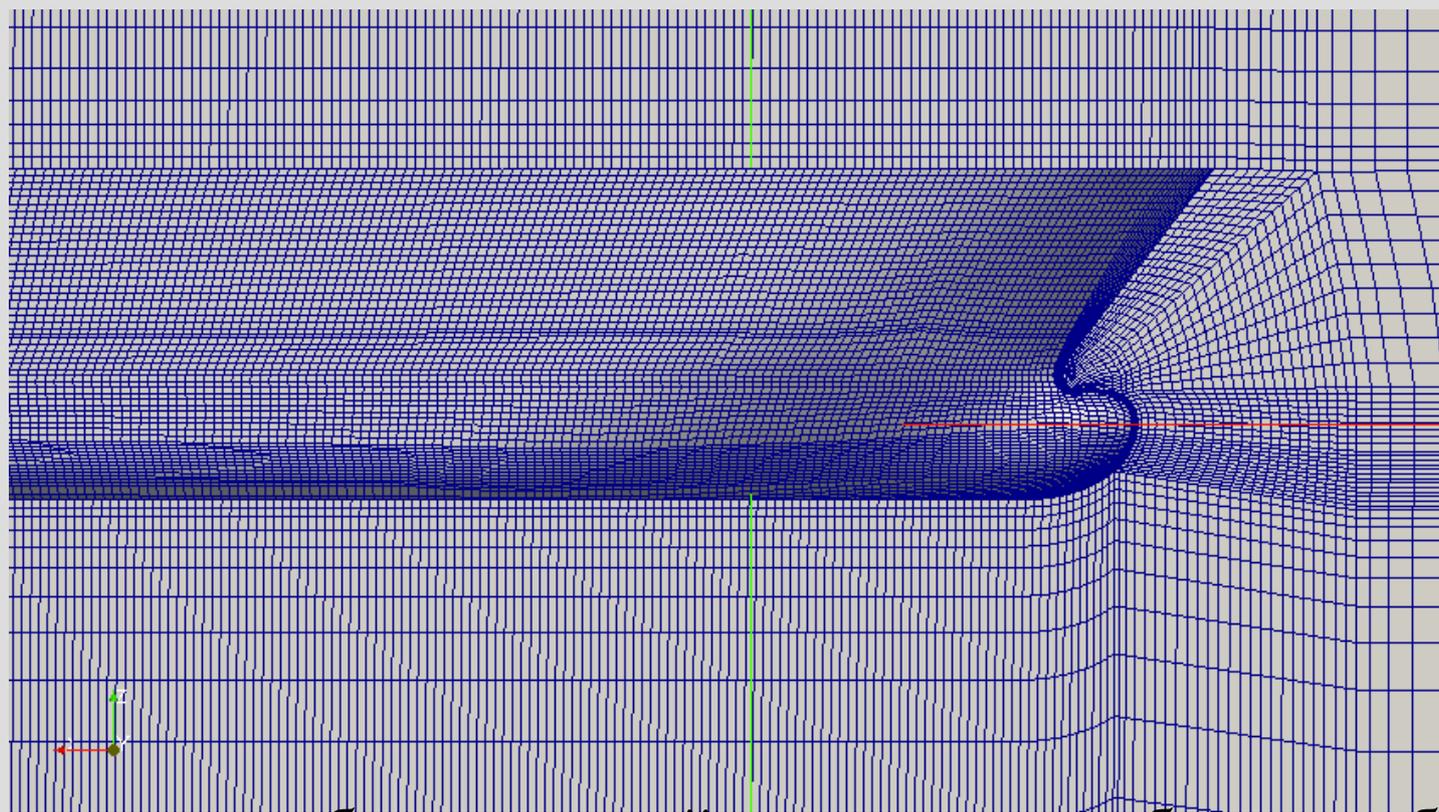
Navier-Stokes equations

Tryaskin N., Tkachenko I.³

Моделирование внешнего обтекания тел

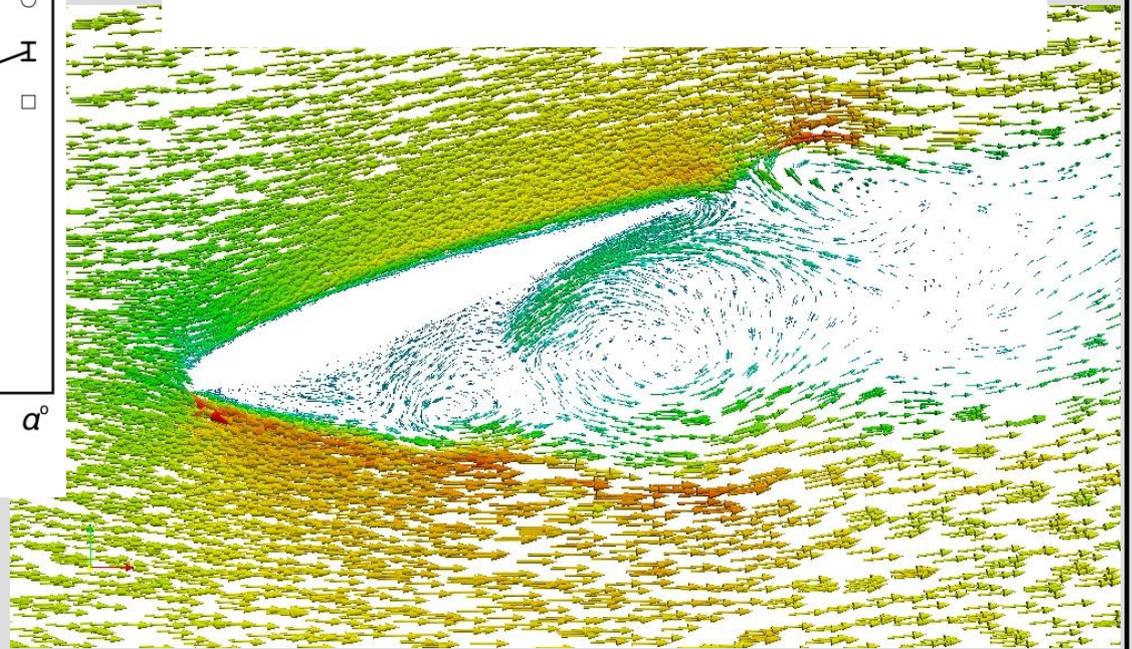
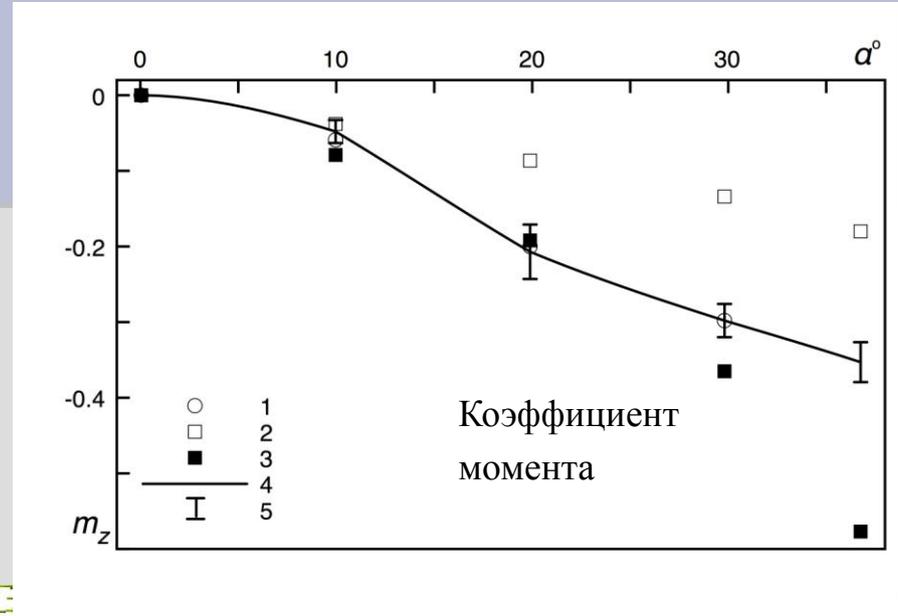
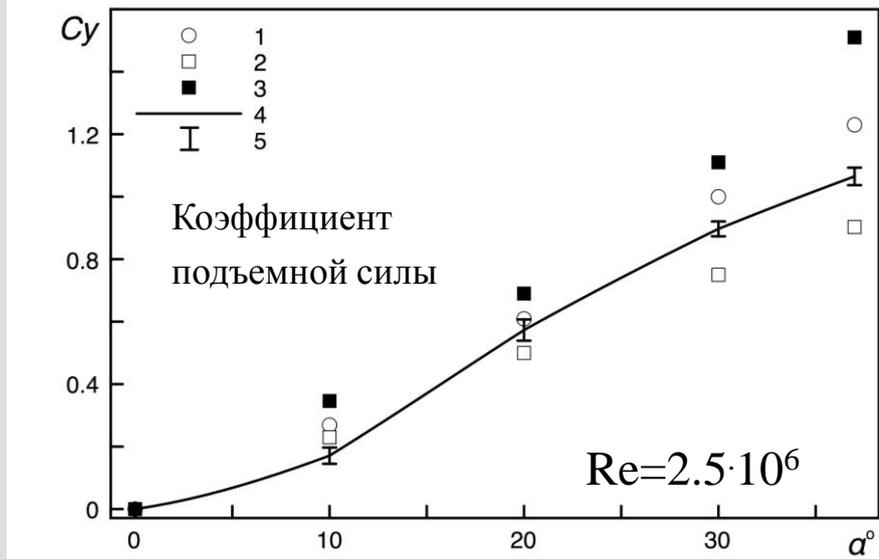
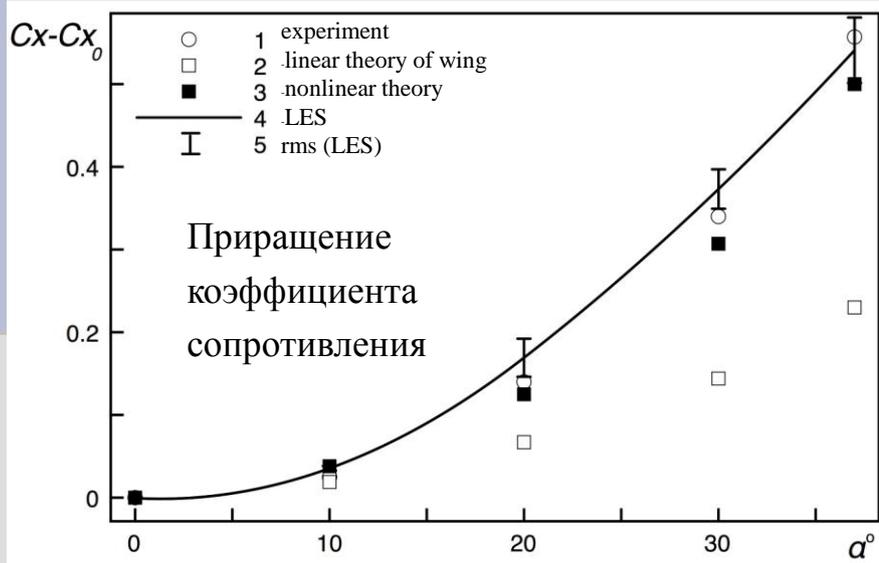
Построение «больших» сеток

Начальная сетка 1,5 млн. -> refineMesh 2X -> на выходе 96 млн.



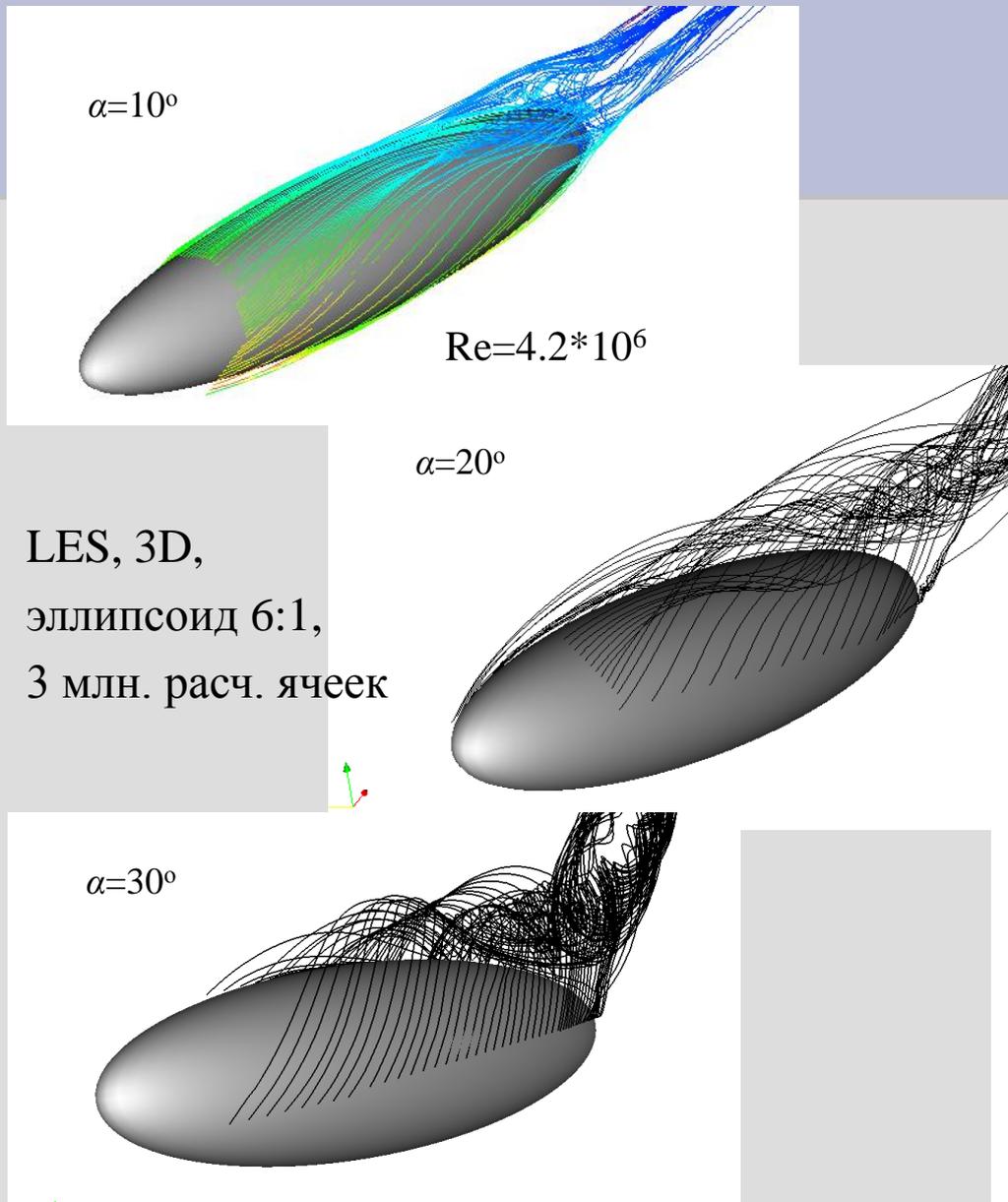
Сгущение сетки: вблизи твердой поверхности, вблизи свободной поверхности.

Обтекание крыла малого удлинения потоком однородной жидкости

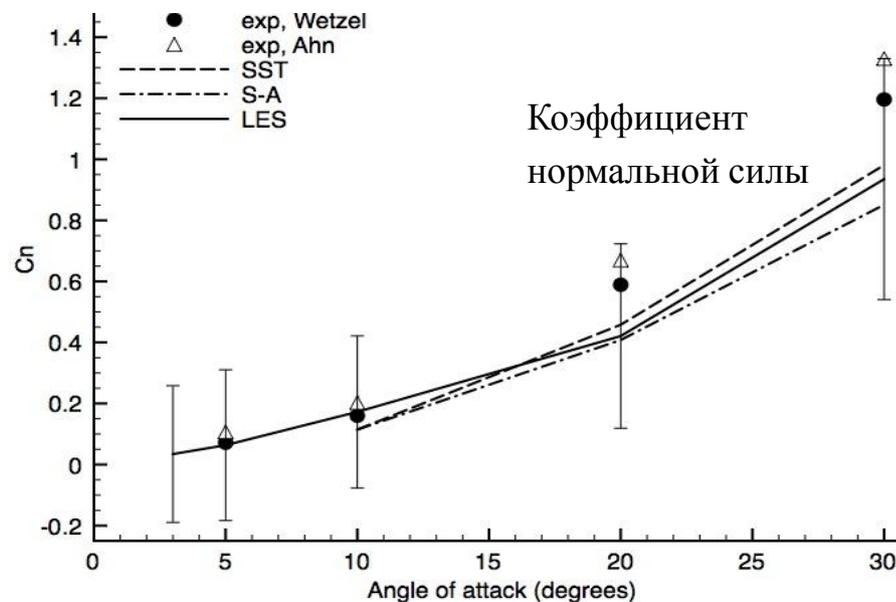
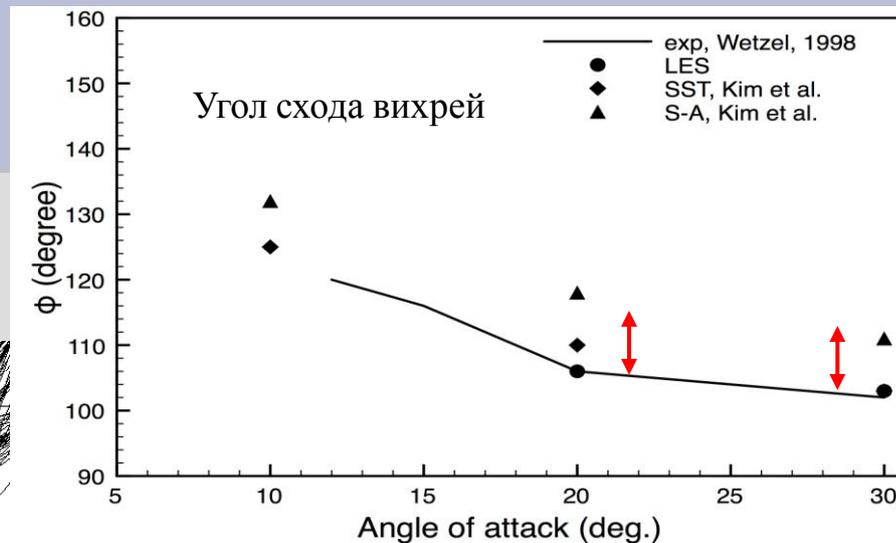


LES, 3D, NASA 0018, Удлинение 1, 20 млн. расч. ячеек

Обтекание эллипсоида вращения однородным потоком

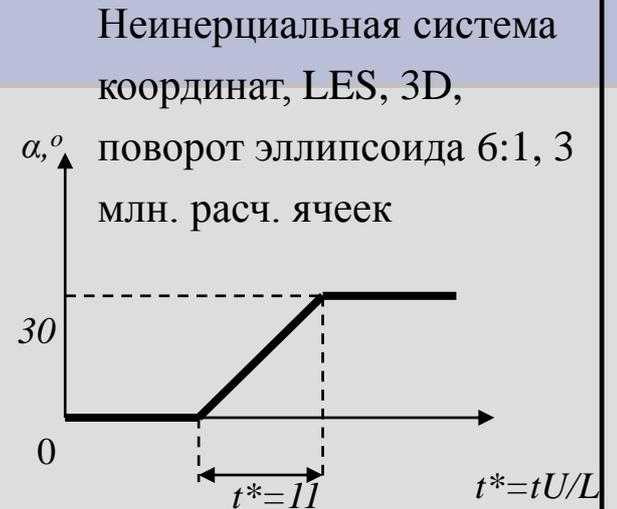
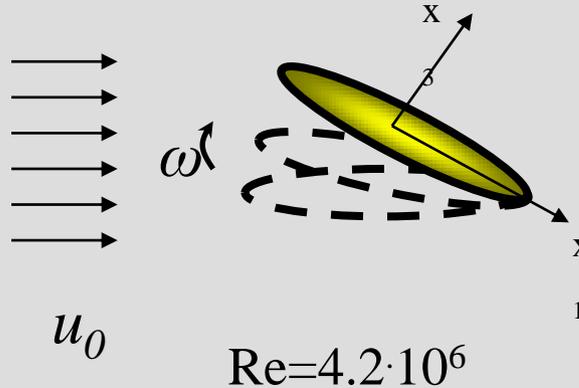
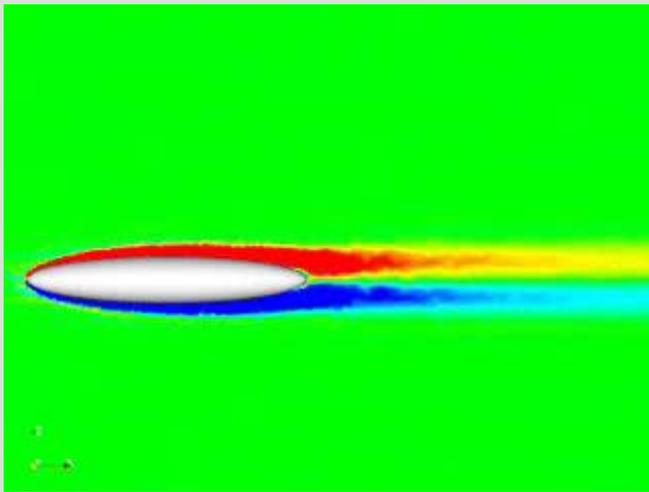


LES, 3D,
эллипсоид 6:1,
3 млн. расч. ячеек

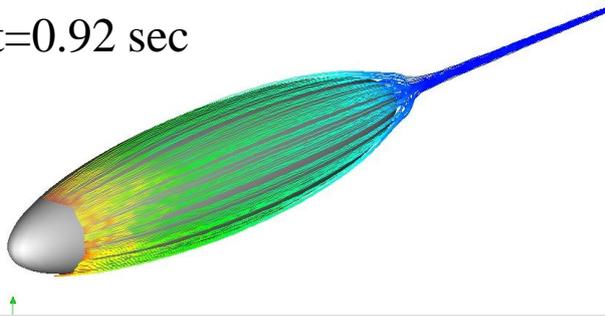


Обтекание эллипсоида вращения, совершающего поворот

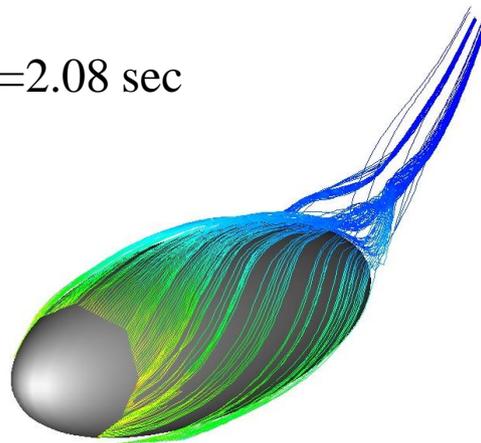
Завихренность



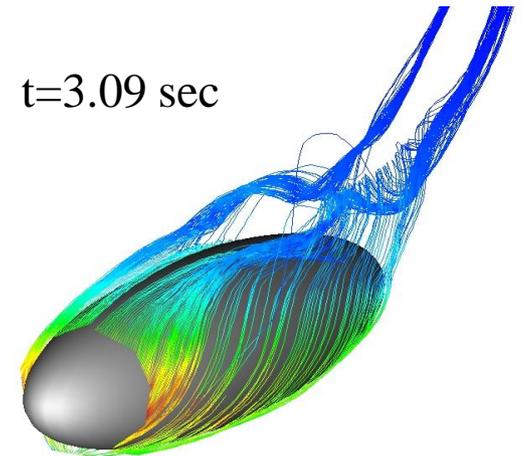
t=0.92 sec



t=2.08 sec

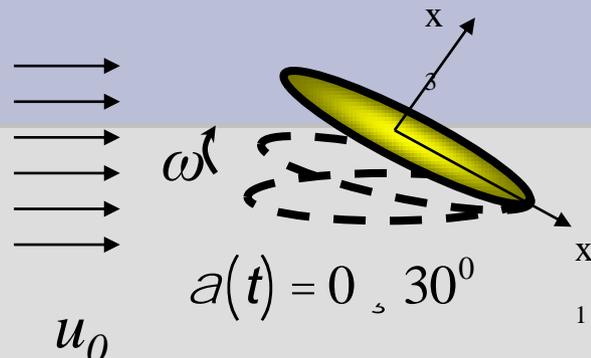


t=3.09 sec

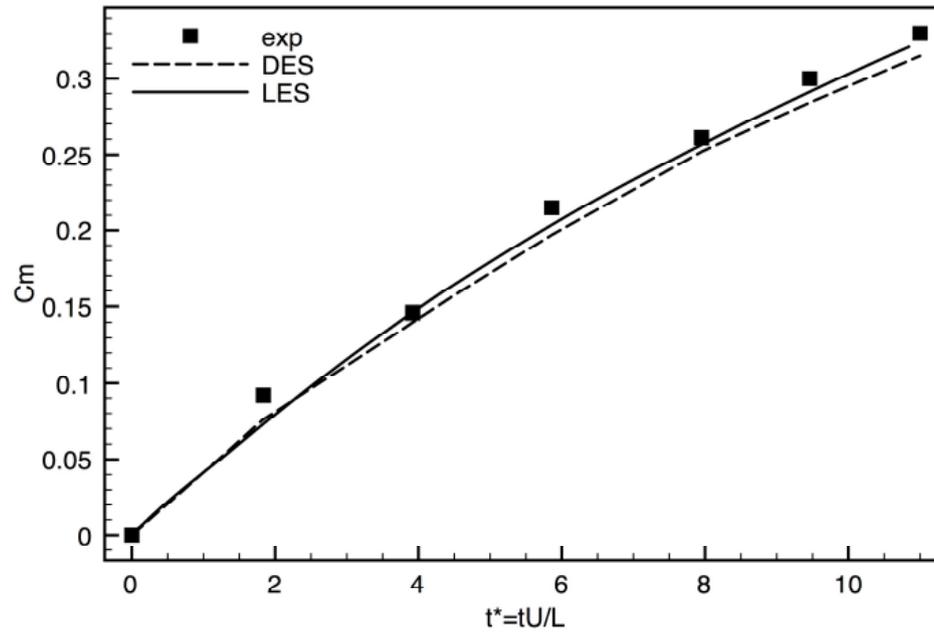
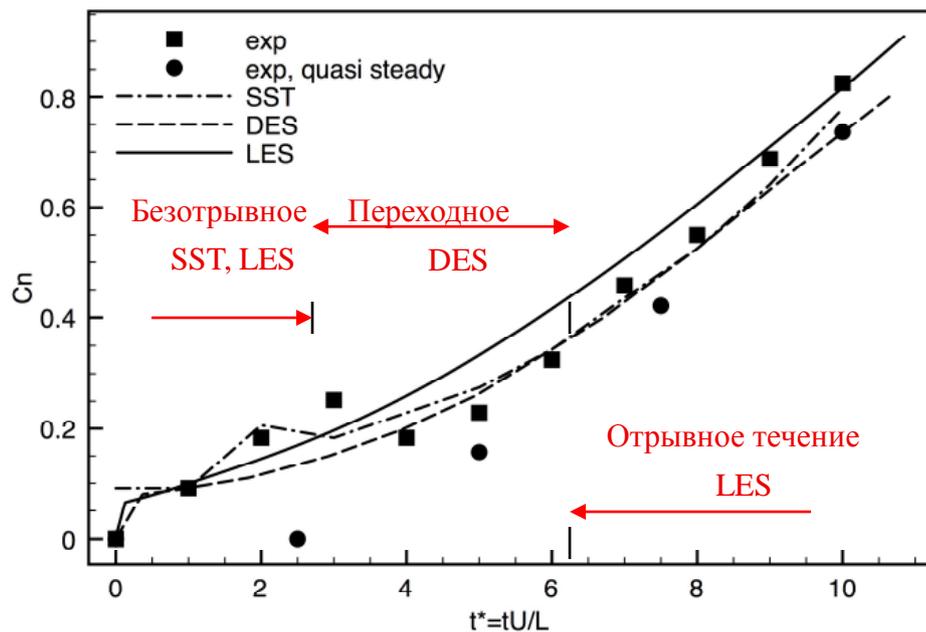


Траектории движения жидких частиц

Обтекание эллипсоида вращения, совершающего поворот



Неинерциальная система координат, LES, 3D, поворот эллипсоида 6:1

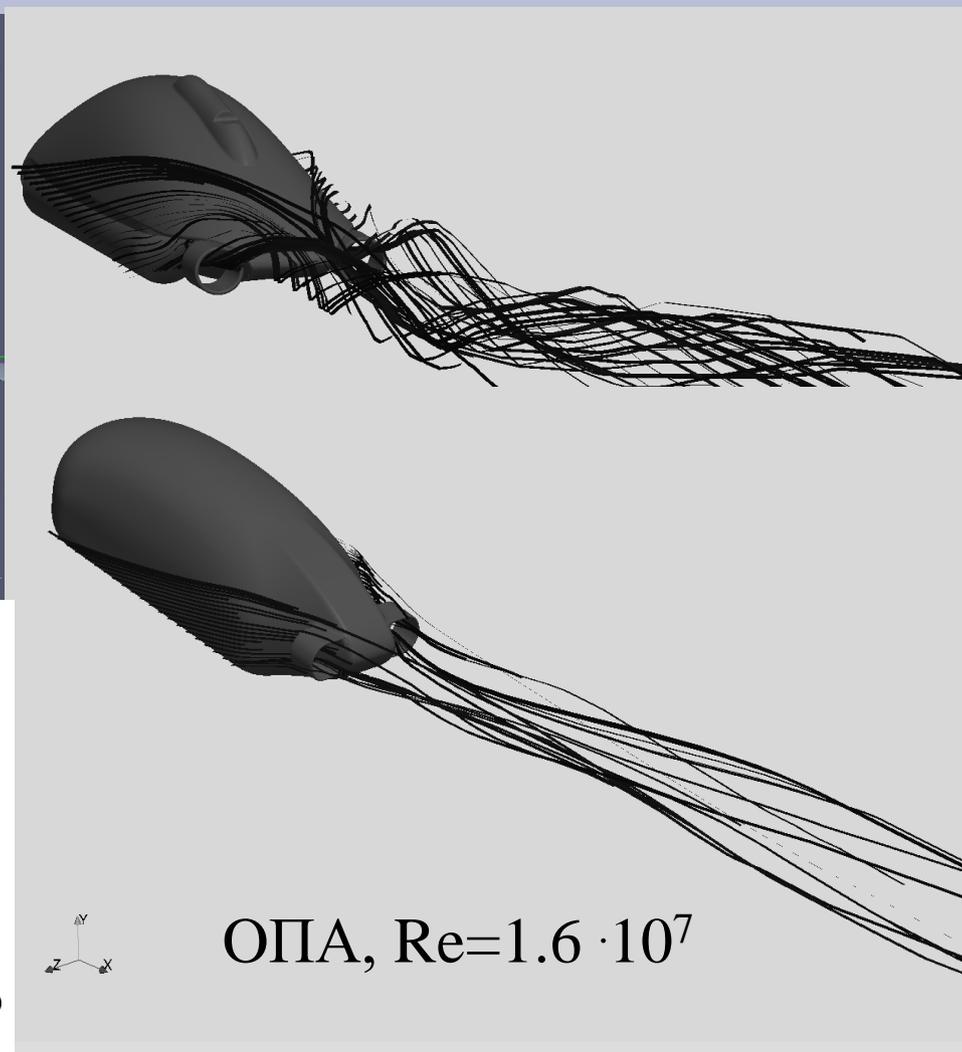
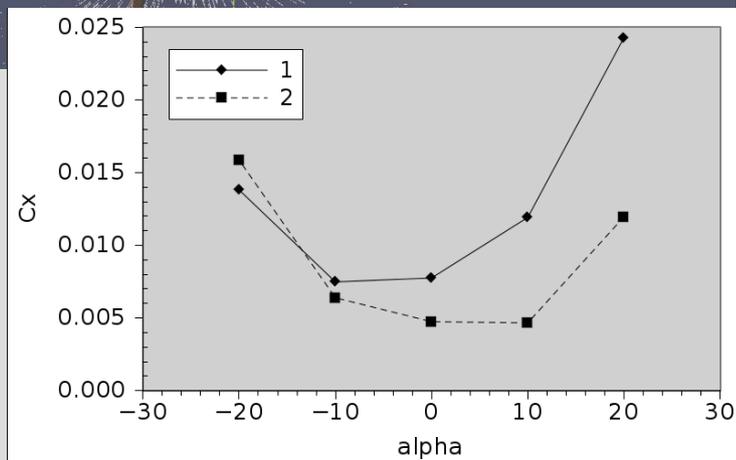
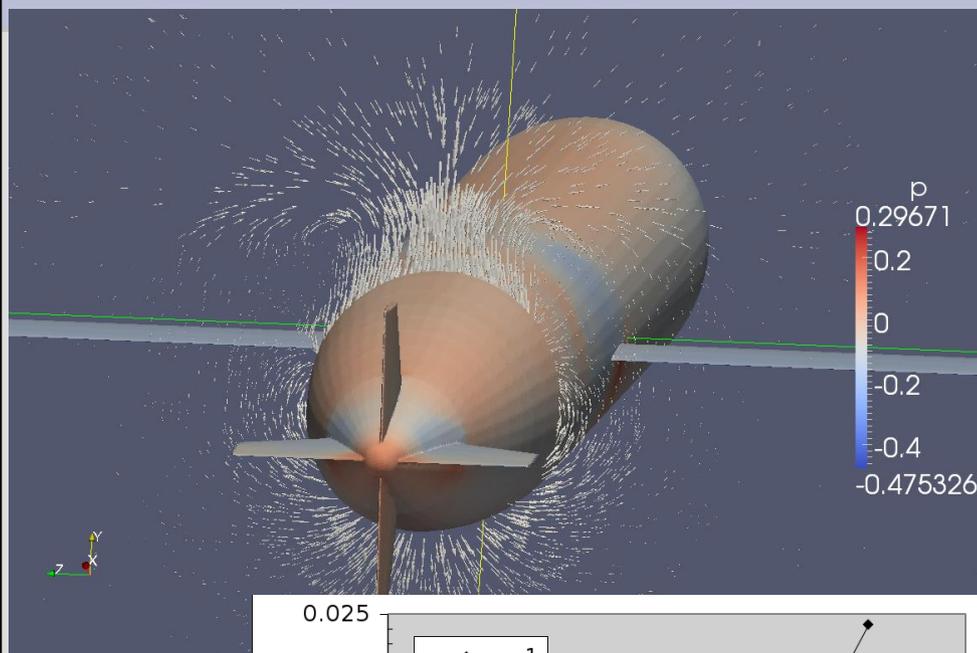


Эволюция нормального коэффициента силы C_n и коэффициента момента C_m .

Exp - Wetzels, 1997, SST - Kim et al., 2003, DES - Kotatpati-Apparao et al., 2003

Обтекание НАПА и ОПА

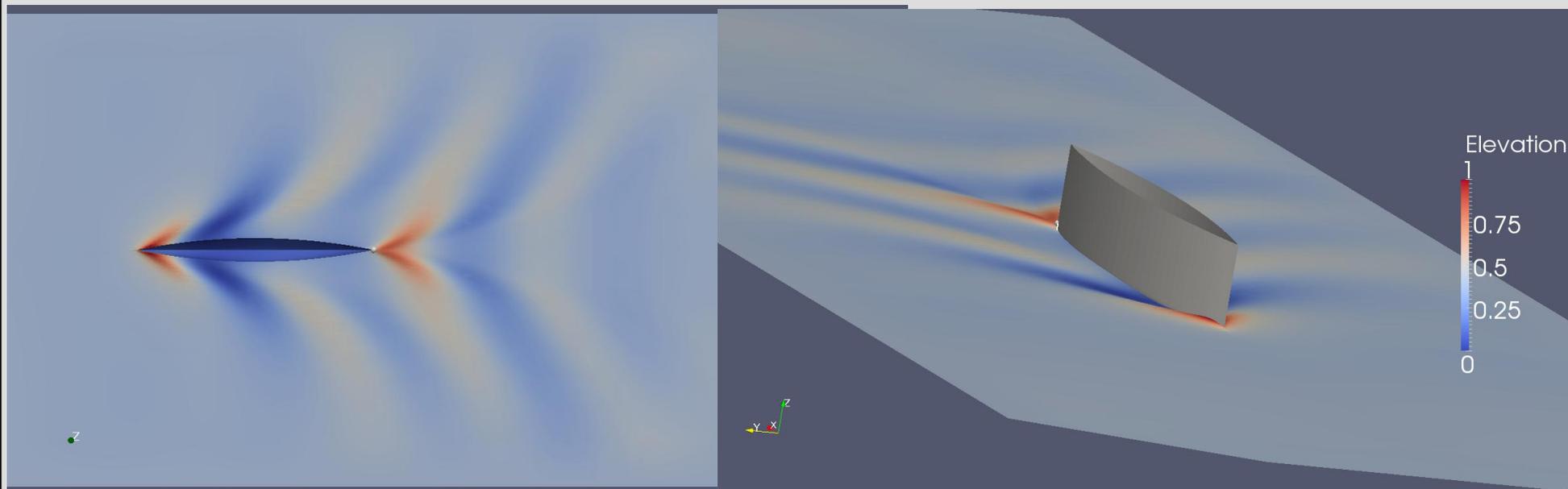
НАПА – Глайдер, $Re=2 \cdot 10^6$



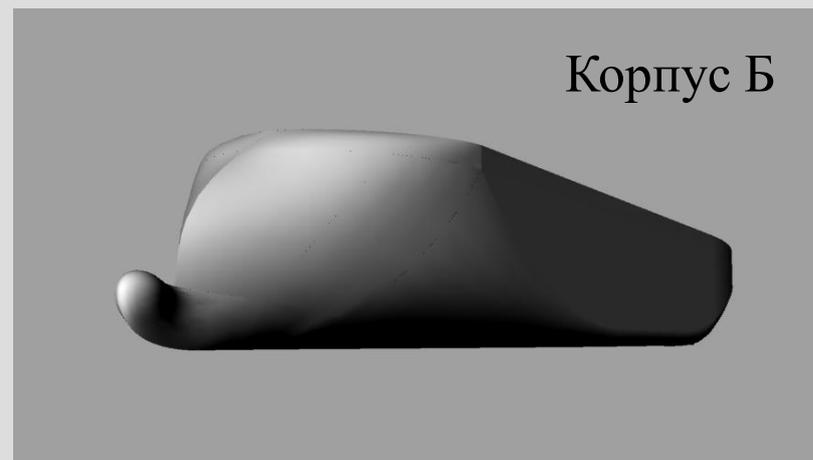
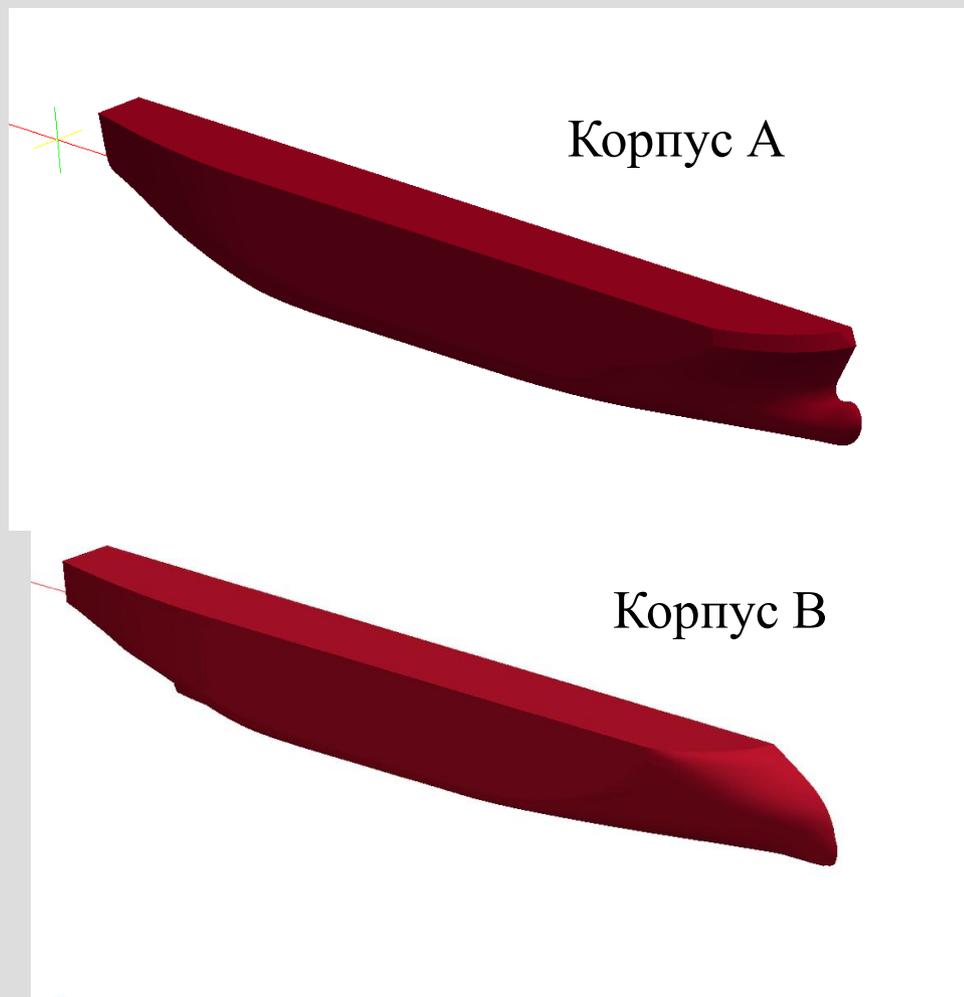
Моделирование движения тела на тихой воде

Движение тела Wigley на ТИХОЙ ВОДЕ

C_T^{calc}	C_T^{exp} [Maki K. Ship Resistance Simulations with OpenFOAM // 6th OpenFOAM Workshop. 13-16 June. Pennsylvania. USA]
0,0046	0,0048

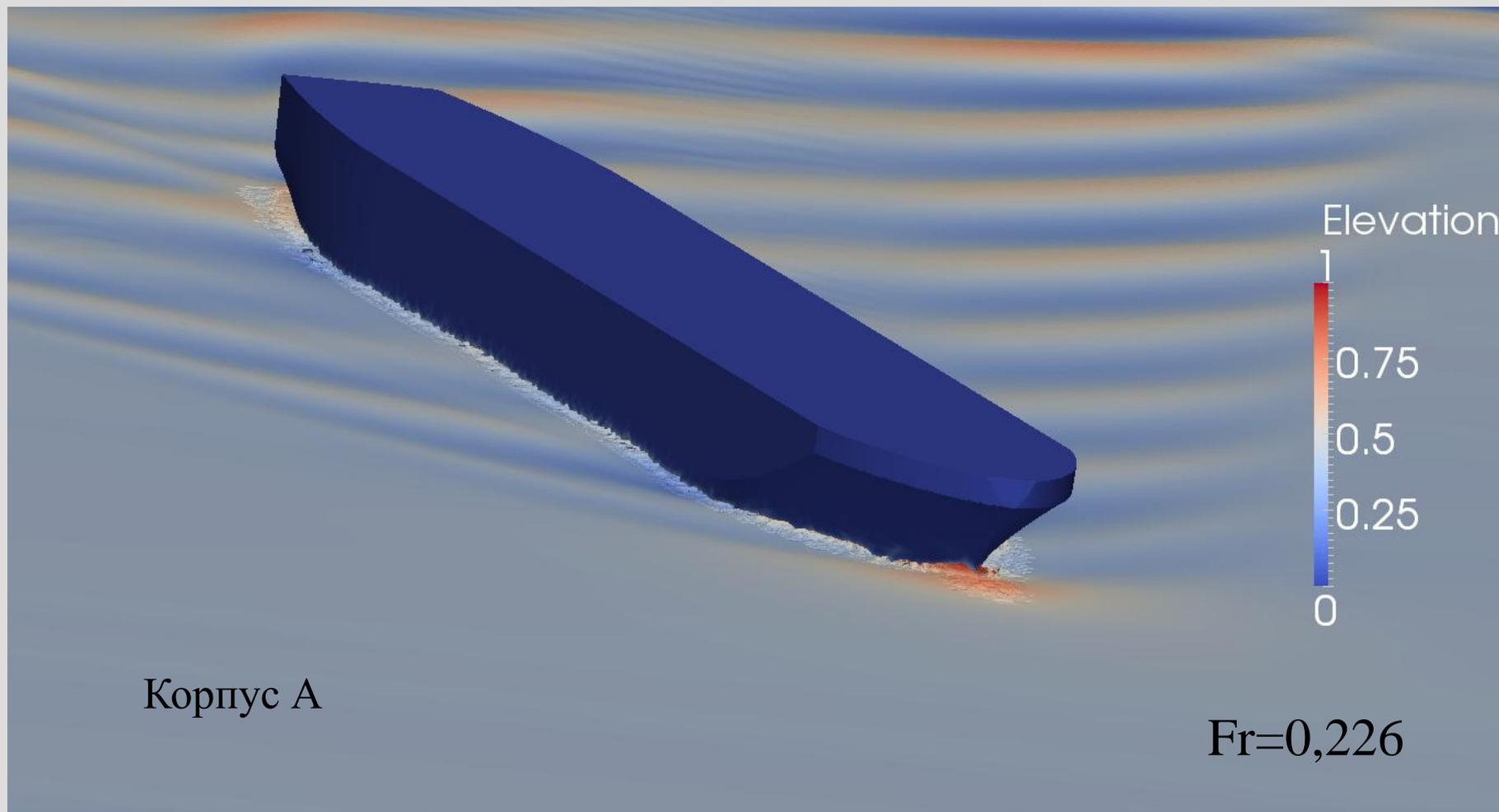


Усовершенствование формы носовой оконечности газовеоза

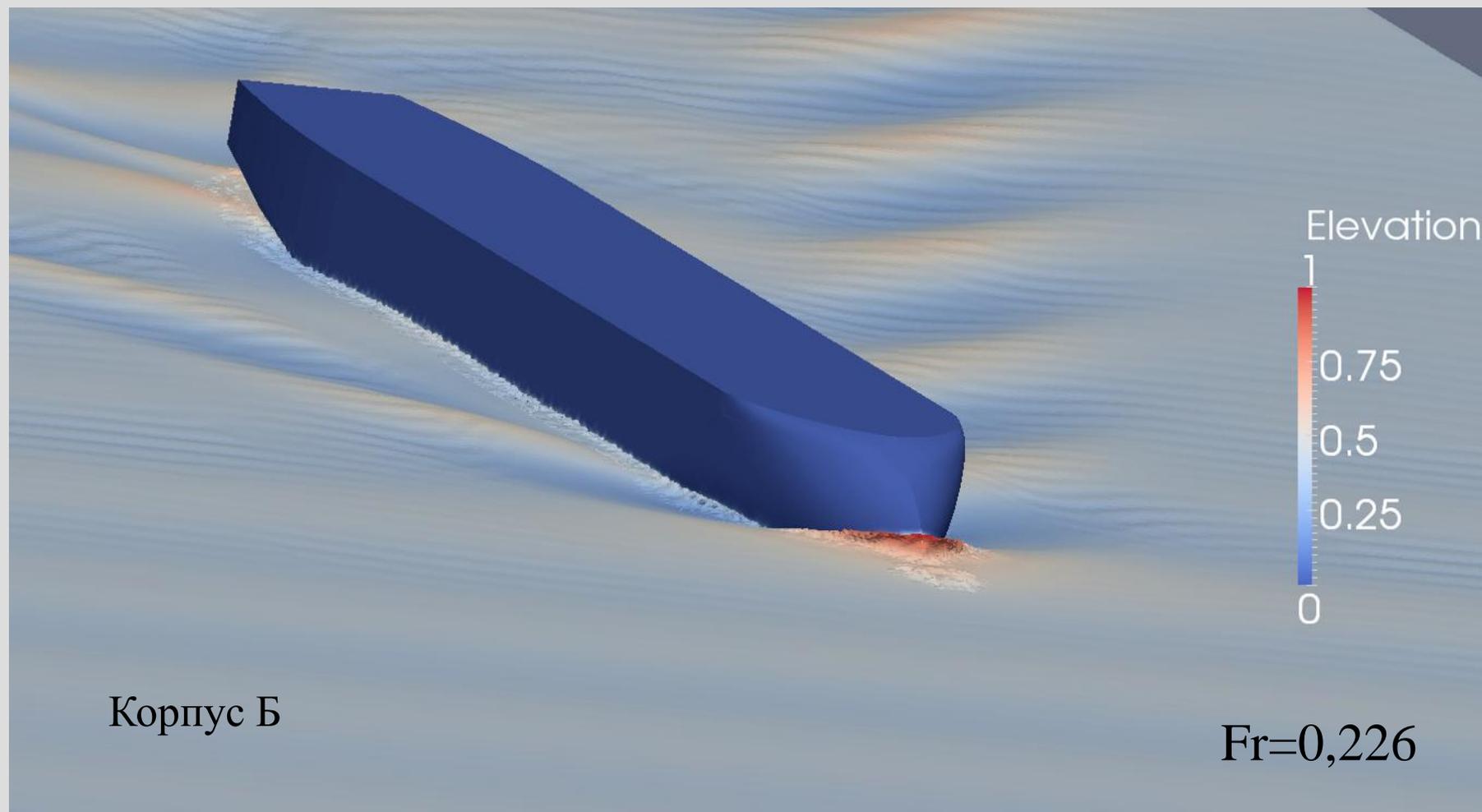


А – традиционная носовая оконечность;
Б – облегченный корпус;
В – облегченный корпус ледового класса.

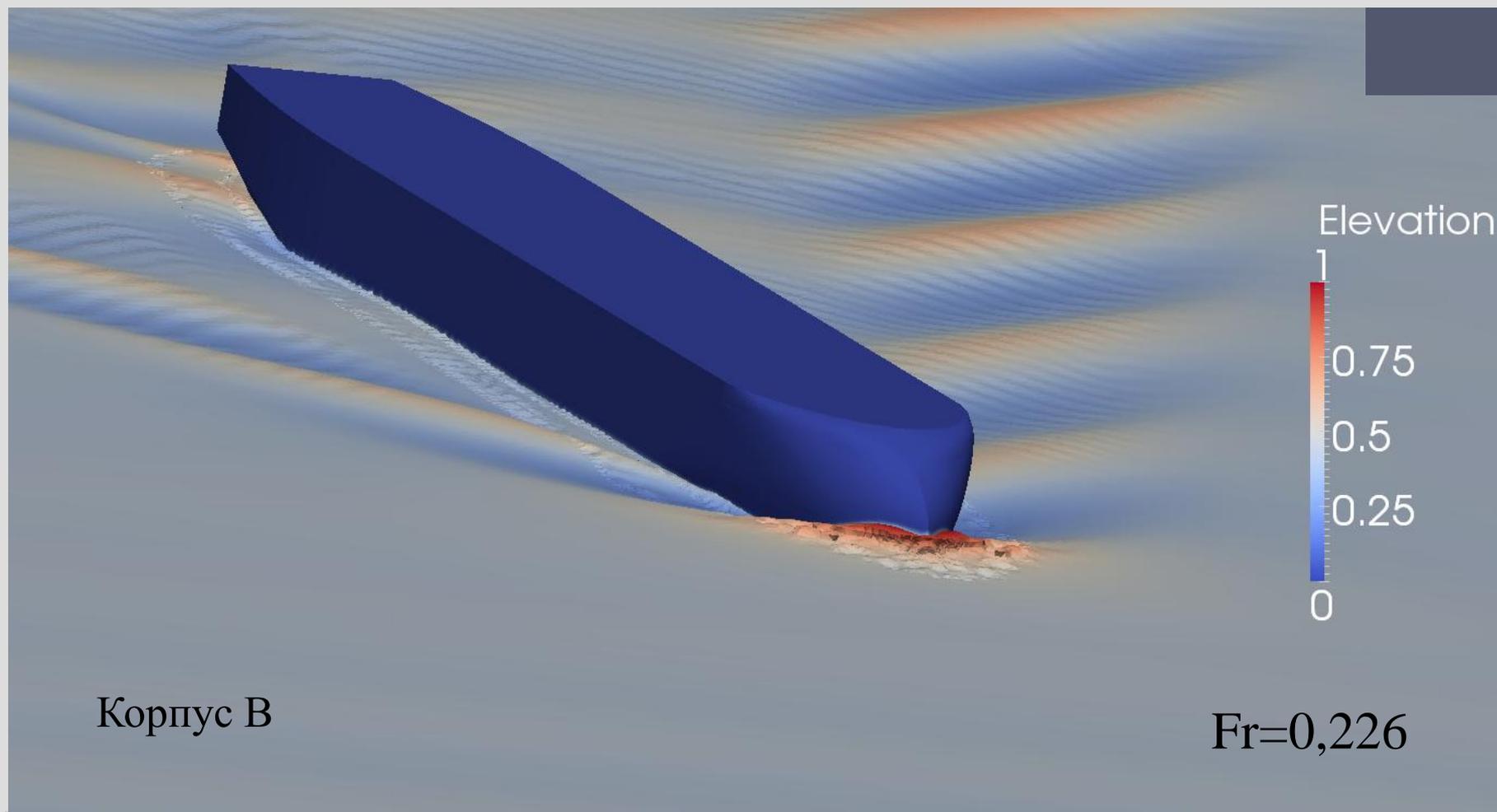
Усовершенствование формы носовой оконечности газовеоза



Усовершенствование формы носовой оконечности газовеоза



Усовершенствование формы носовой оконечности газовеоза

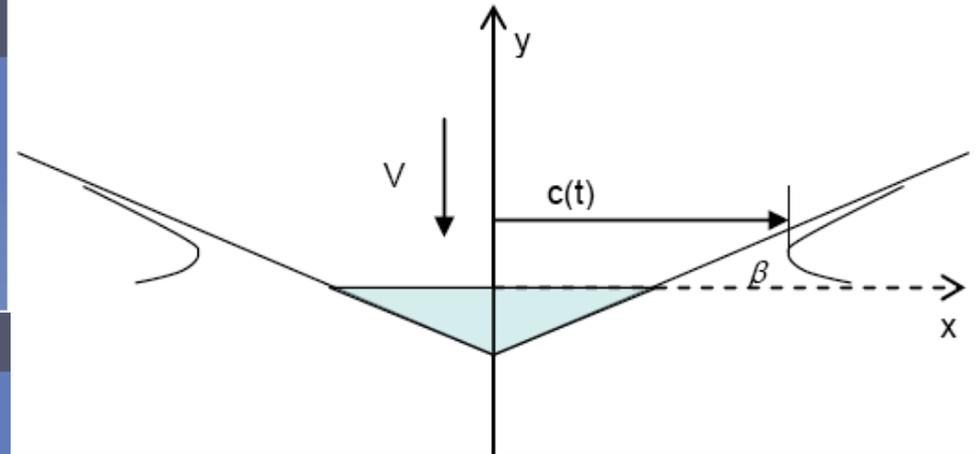
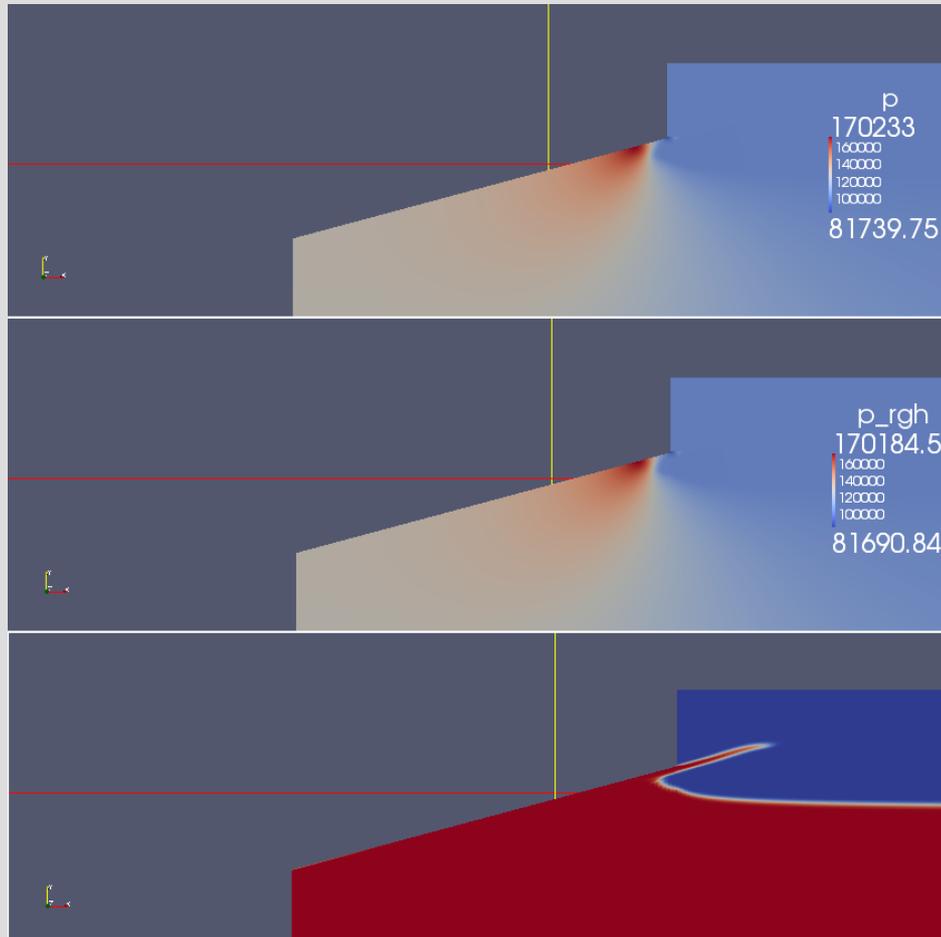


Усовершенствование формы носовой оконечности газовоза



Корпус В

Слеминг: падение клина в жидкость



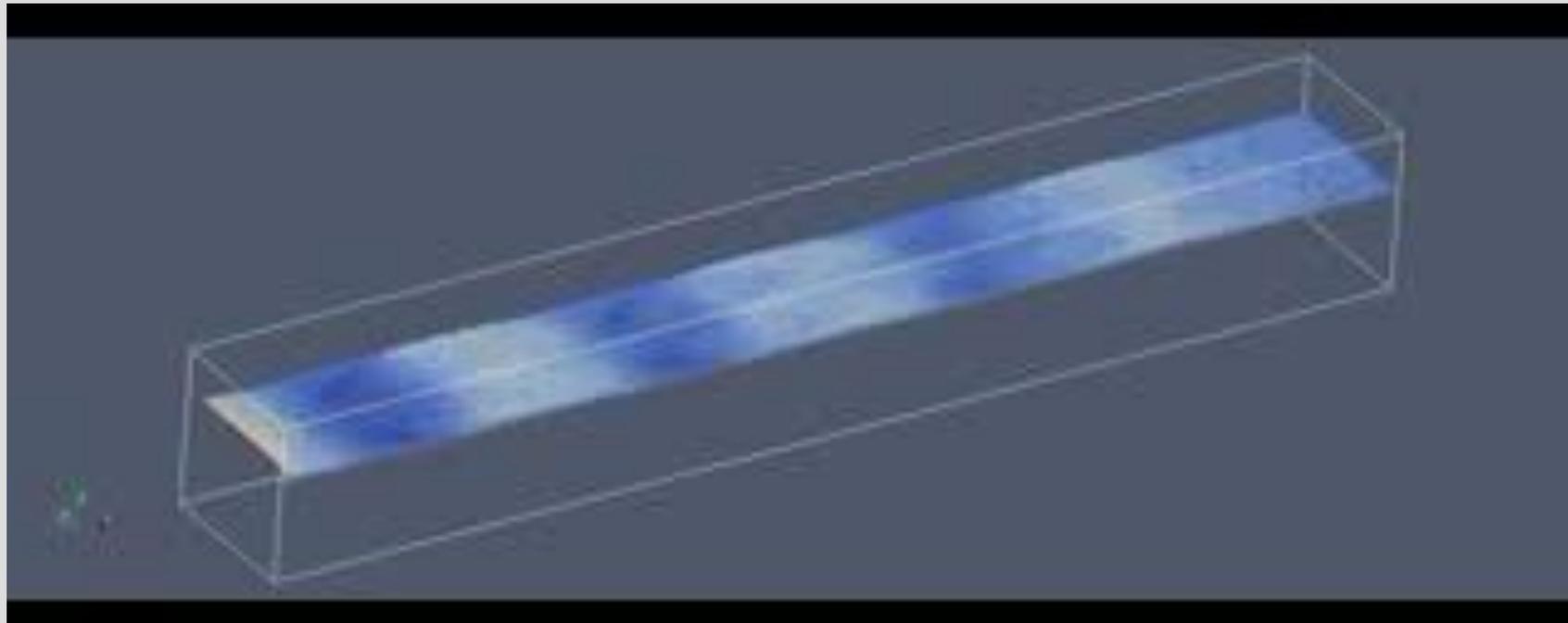
Поле давления, поле избыточного давления и положение свободной поверхности. Момент времени $t=0.04$ с

OpenFOAM, InterDyMFOAM, 2D

Моделирование волнения и динамики тела

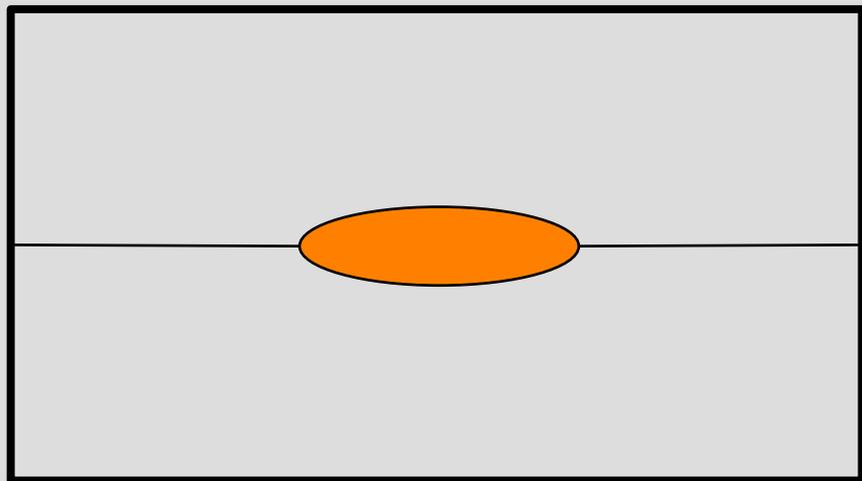
Моделирование регулярного волнения

- Волна Стокса 2-го порядка:
 - Колебание уровня на границе (InterFoam);
 - Буферные зоны на входном и выходном участках (WaveFoam).



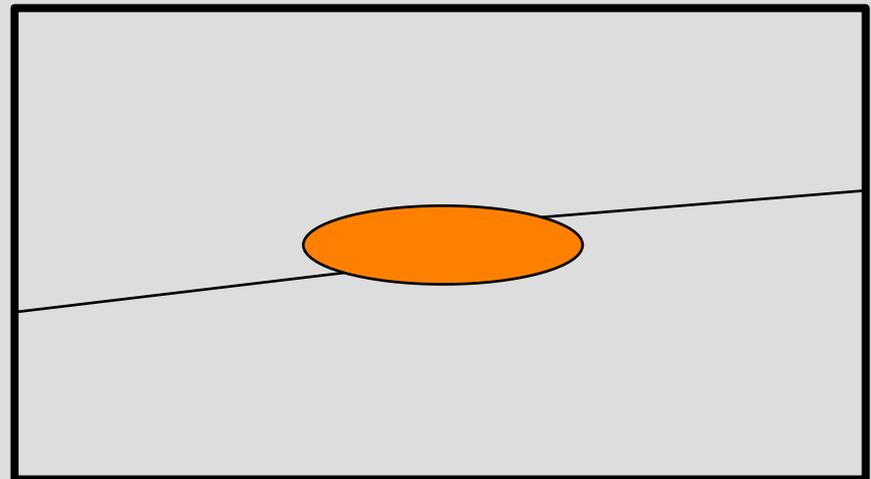
Моделирование динамики тела

- Связанная система координат (MRF) – подвижные ГУ.



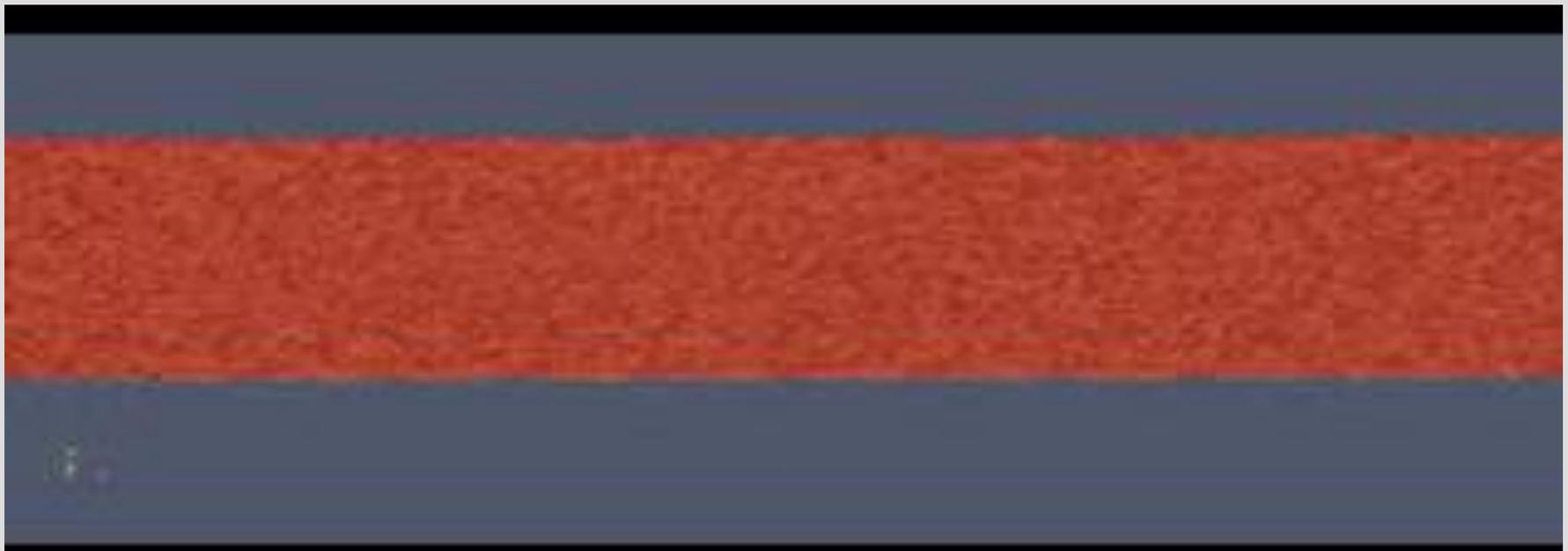
t1

t2



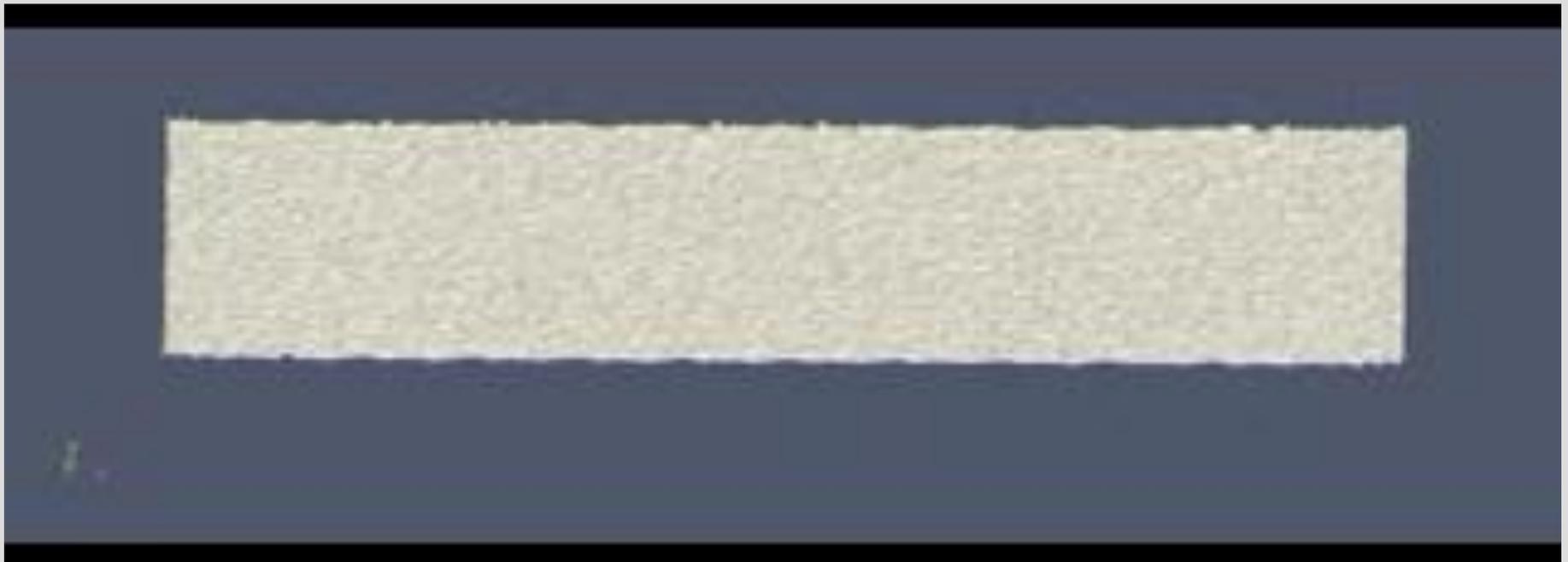
Моделирование динамики тела

- 1DOF (всплытие понтона, вертикальные перемещения, MRF), $Fr=0.6$, $Re=2 \cdot 10^7$.



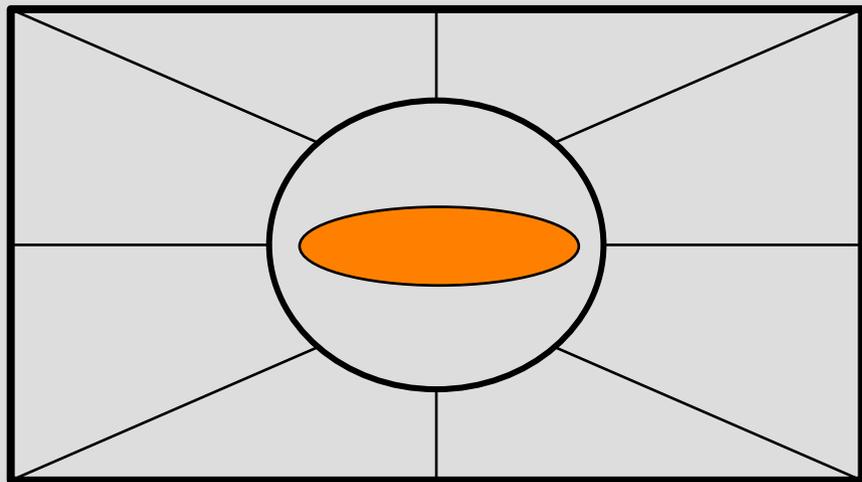
Моделирование динамики тела

- 2DOF (всплытие понтона, вертикальные перемещения и угол дифферента, MRF), $Fr=0.6$, $Re=2 \cdot 10^7$.



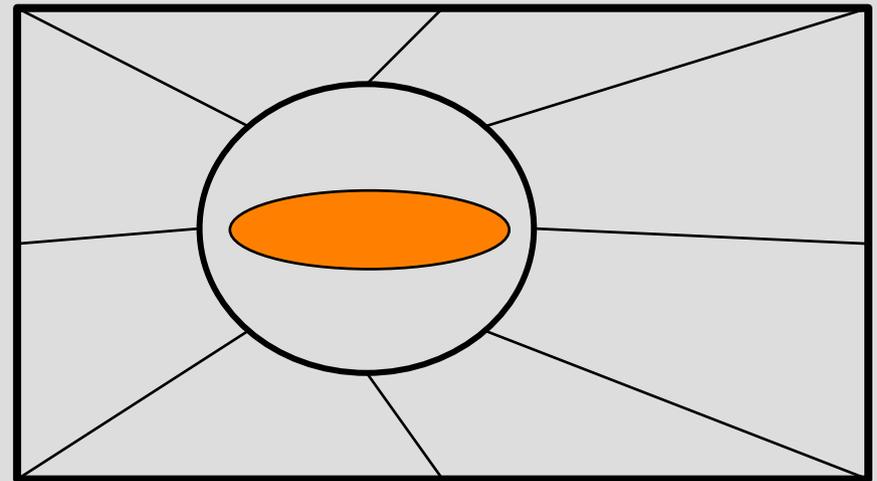
Моделирование динамики тела

- Динамические сетки (DyM) – неподвижные ГУ, подвижная вложенная секта.



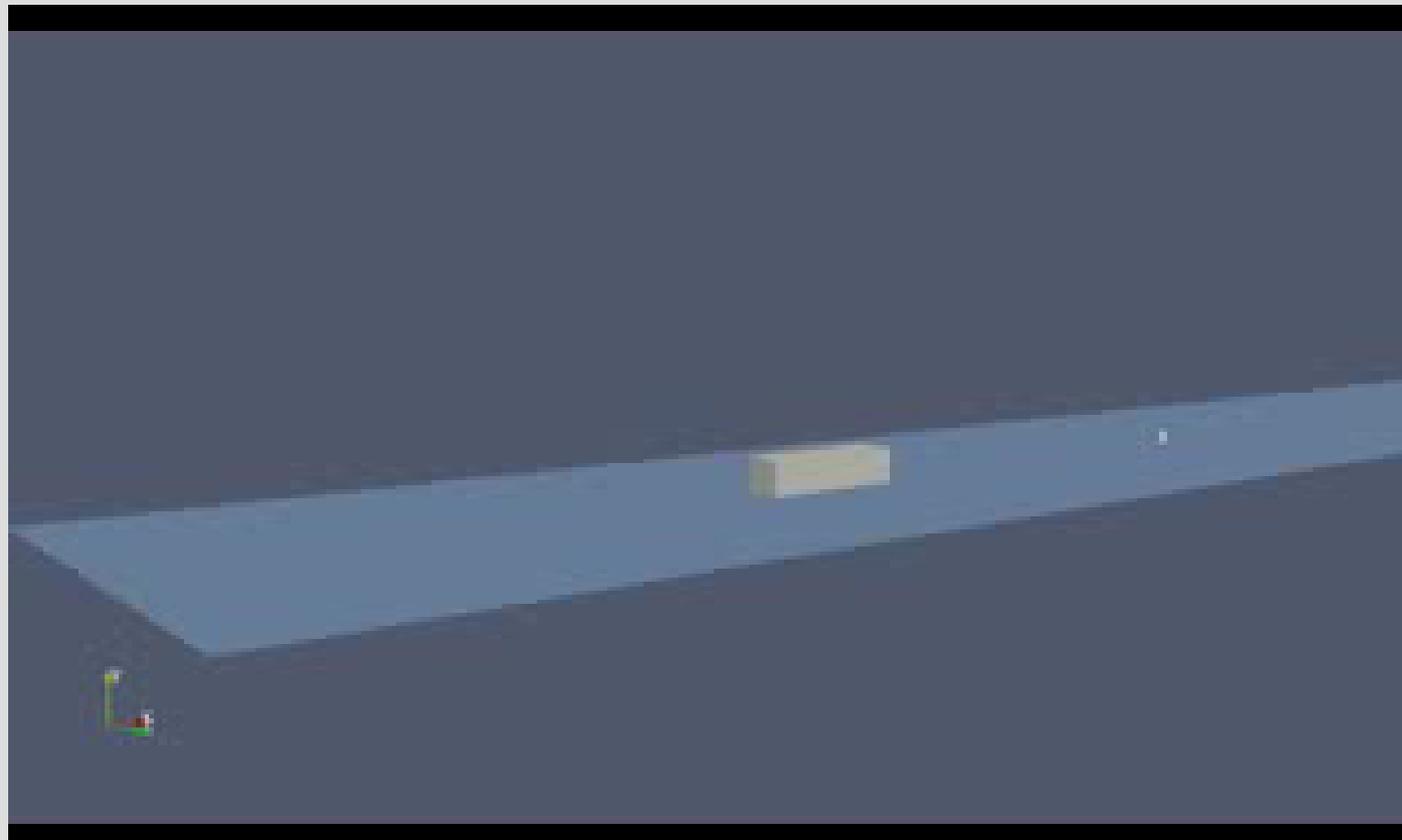
t1

t2



Динамика тела на волнении

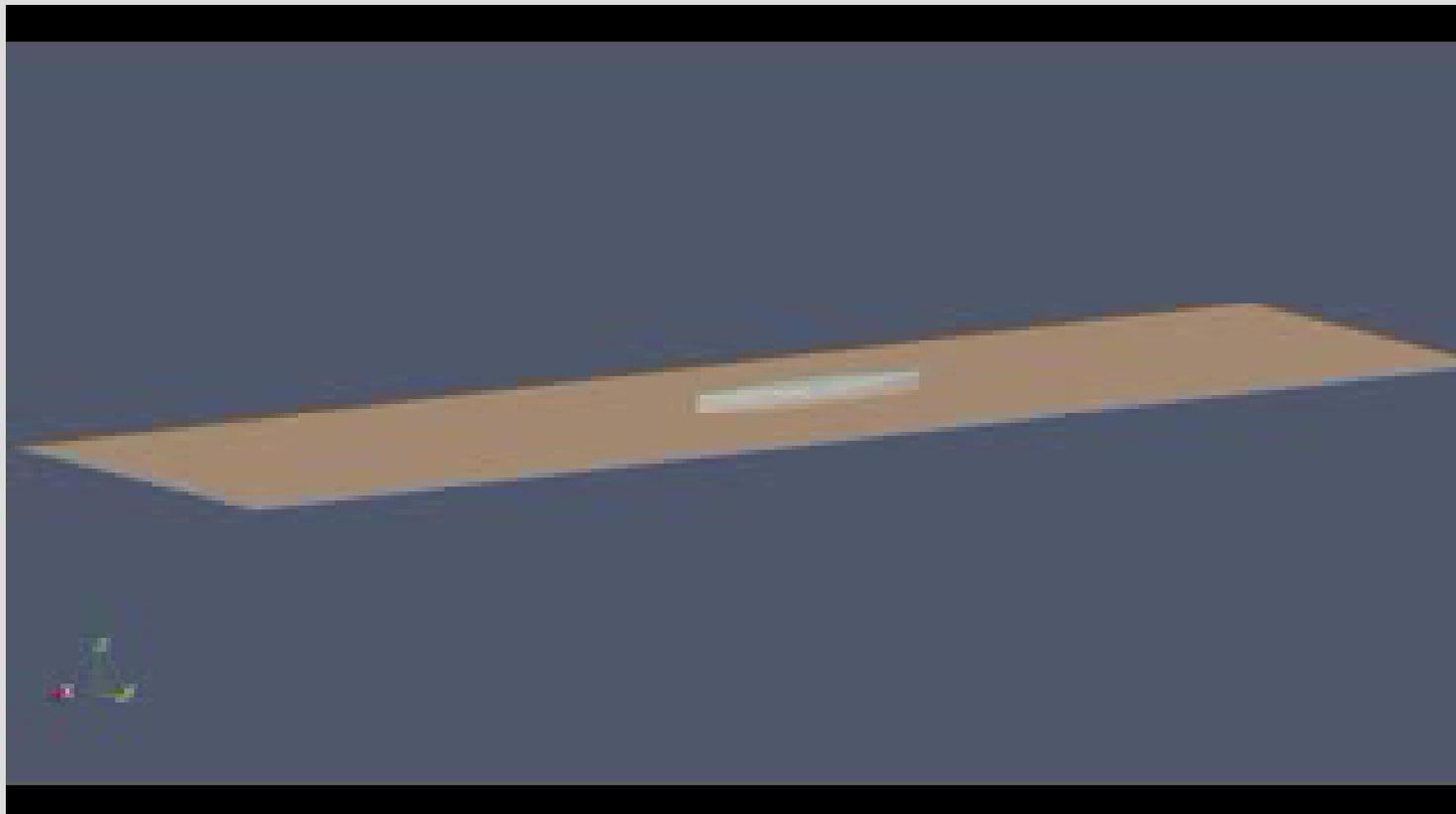
- 6DOF (взаимодействие понтона с внешним волнением, waveDyMFoam), $Fr=0$



Метод
определения
моментов
инерции

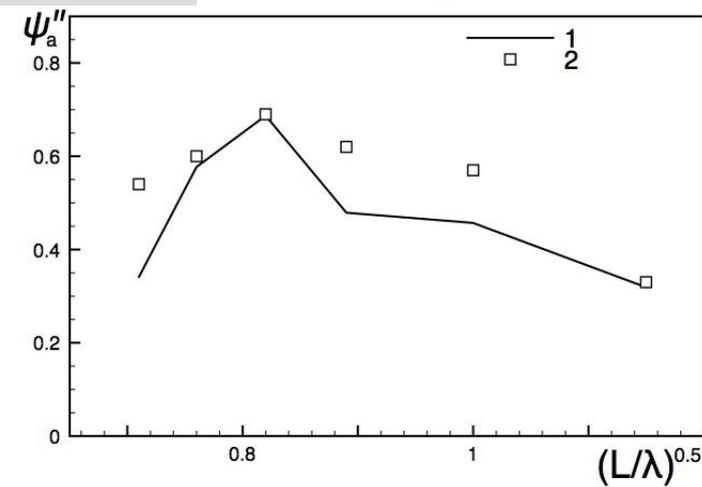
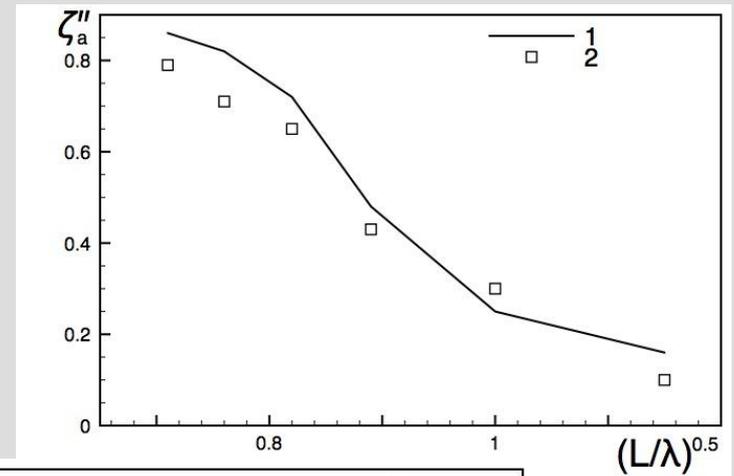
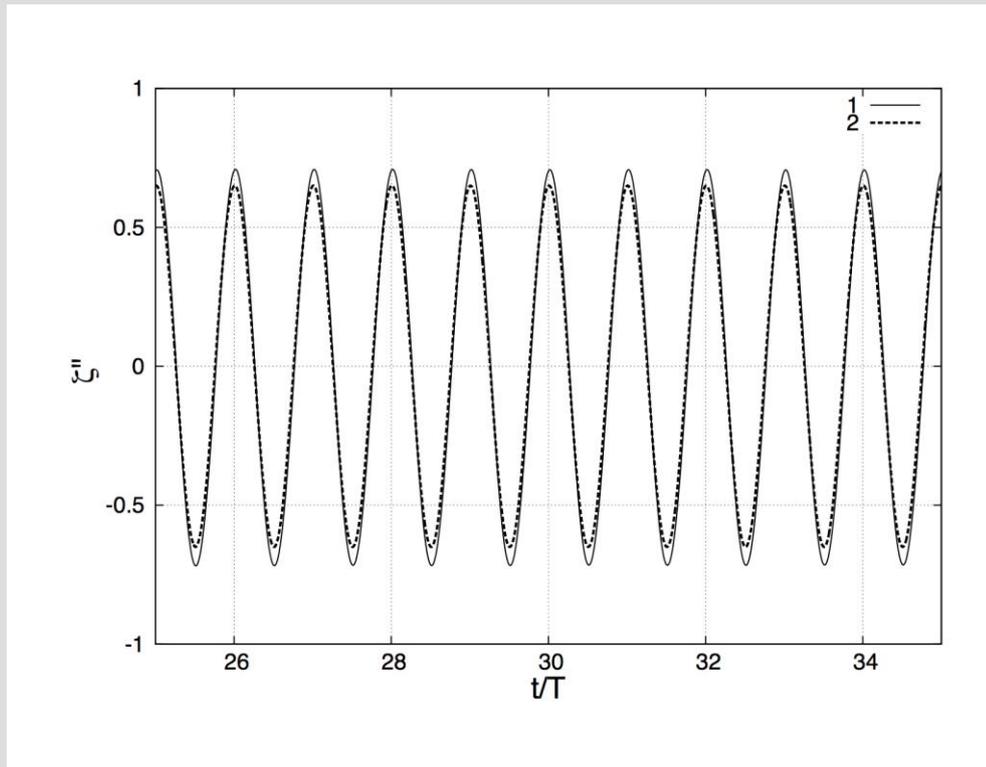
Динамика тела на волнении

- 6DOF (взаимодействие судна Wigley с внешним волнением, waveDymFoam), $Fr=0$



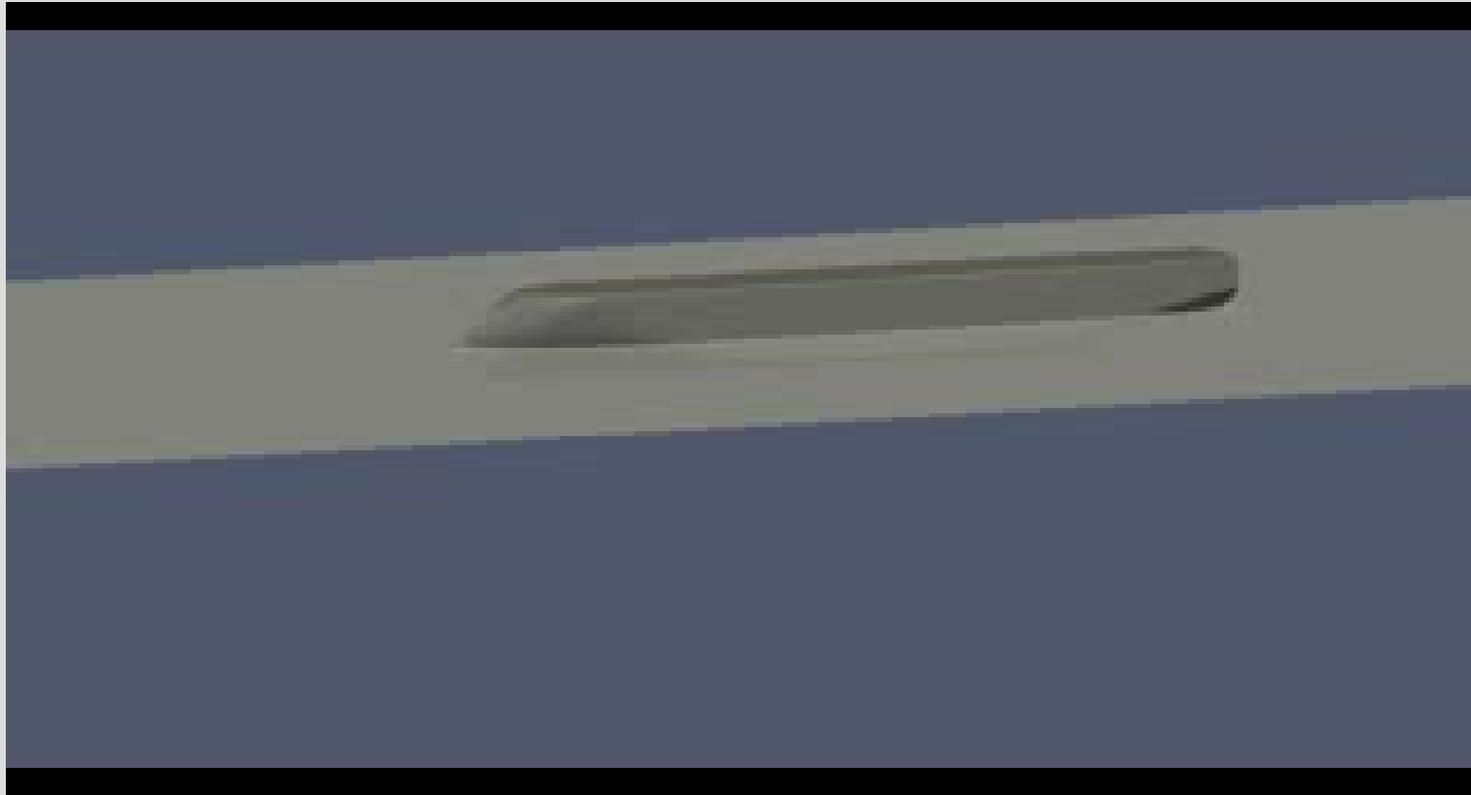
Динамика тела на волнении

- Определение параметров качки судна Wigley



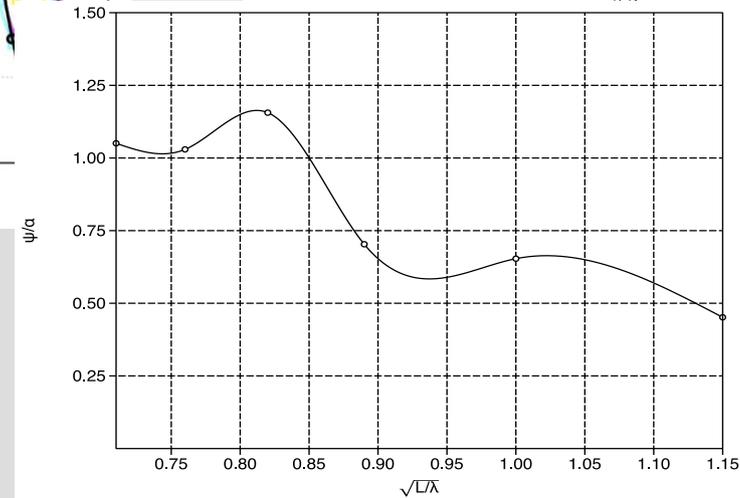
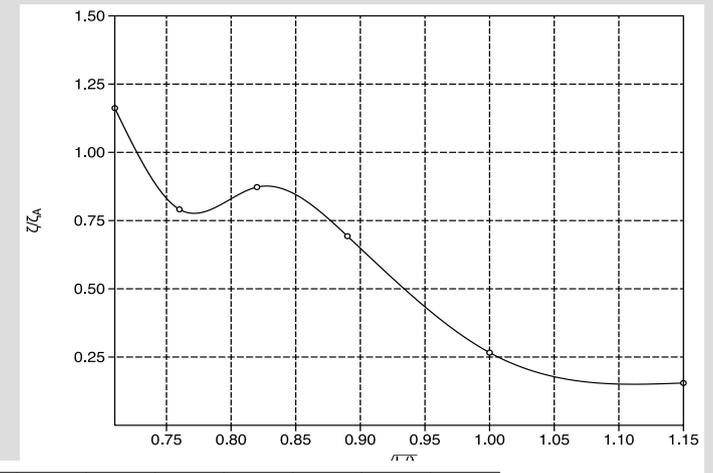
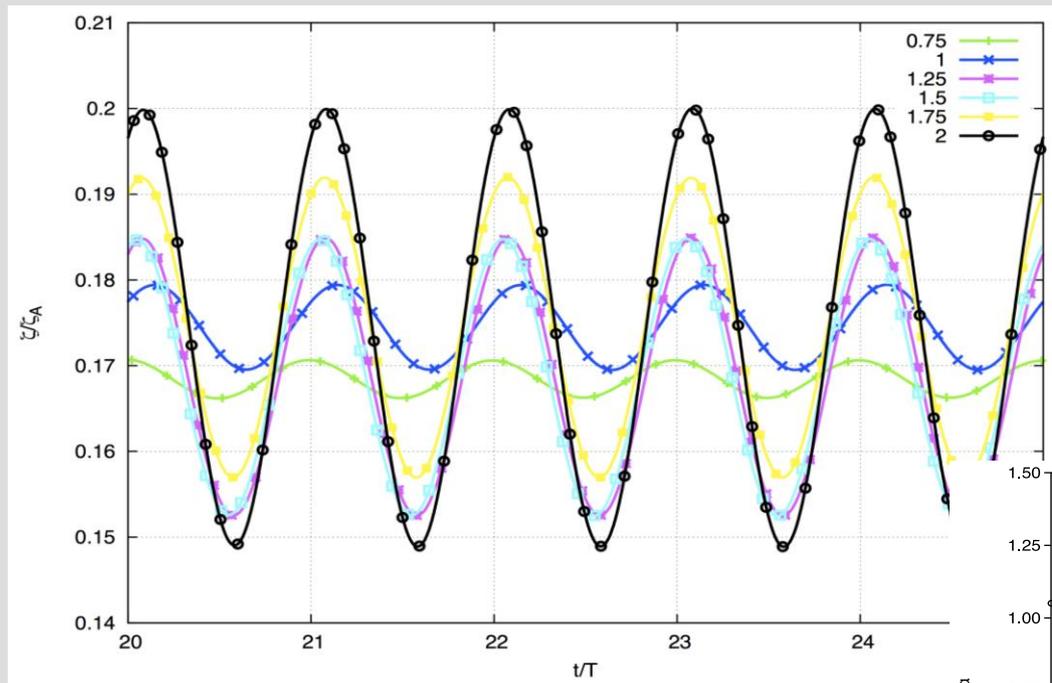
Динамика тела на волнении

- 6DOF (взаимодействие газовой среды с внешним волнением, waveDymFoam), $Fr=0$



Динамика тела на волнении

- Определение параметров качки газовоза

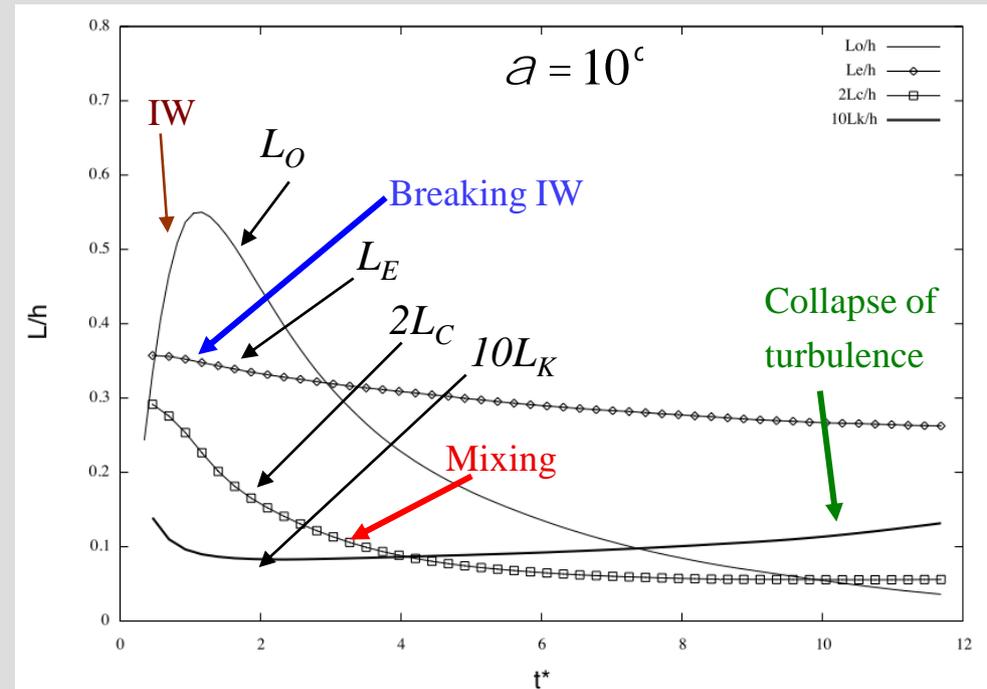
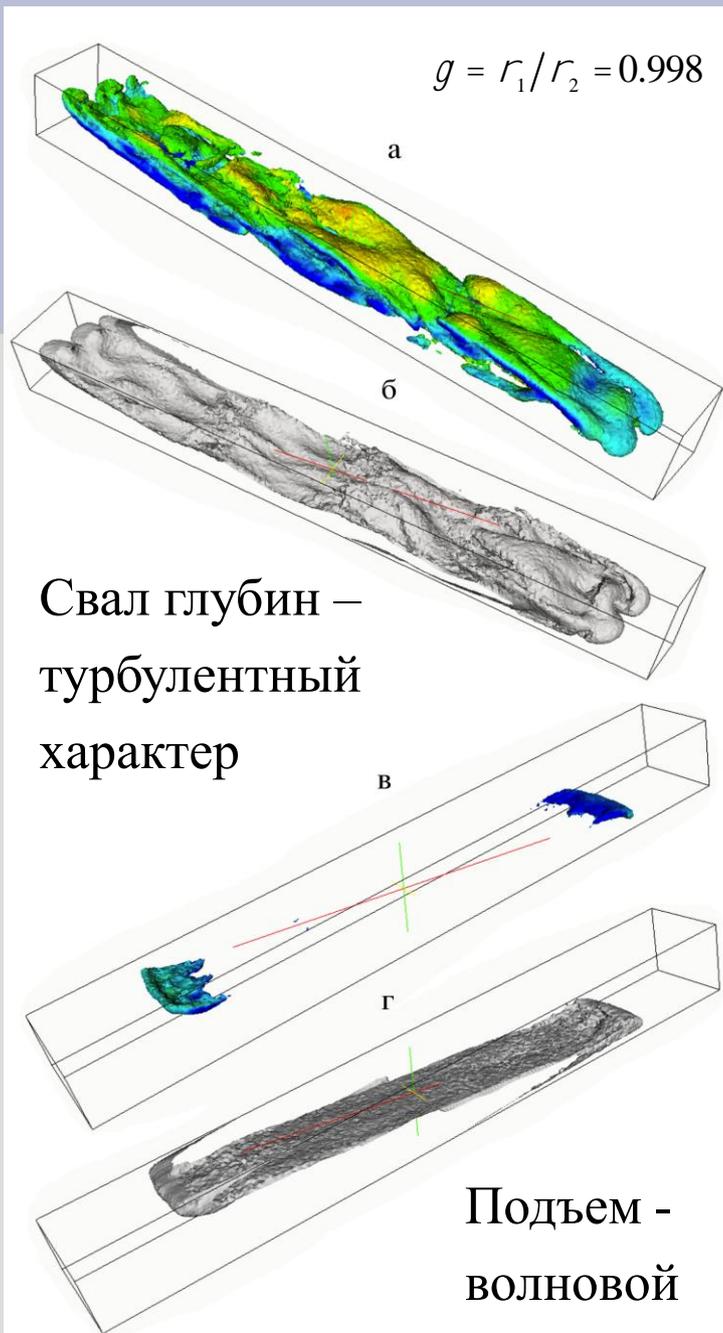


Моделирование геофизических течений

Гравитационные течения на шельфе

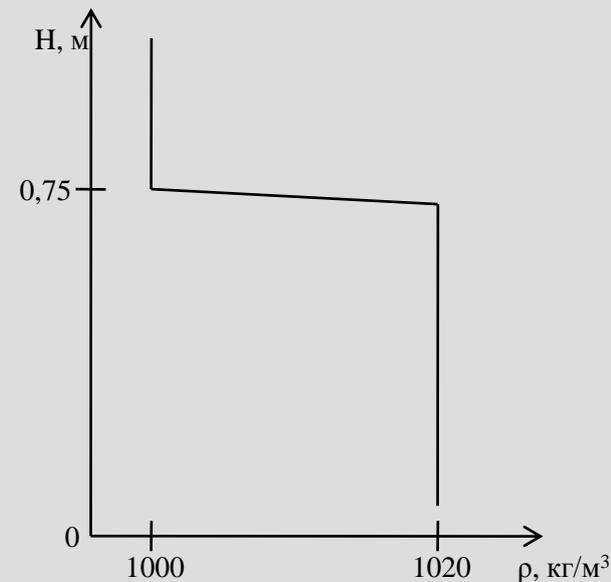
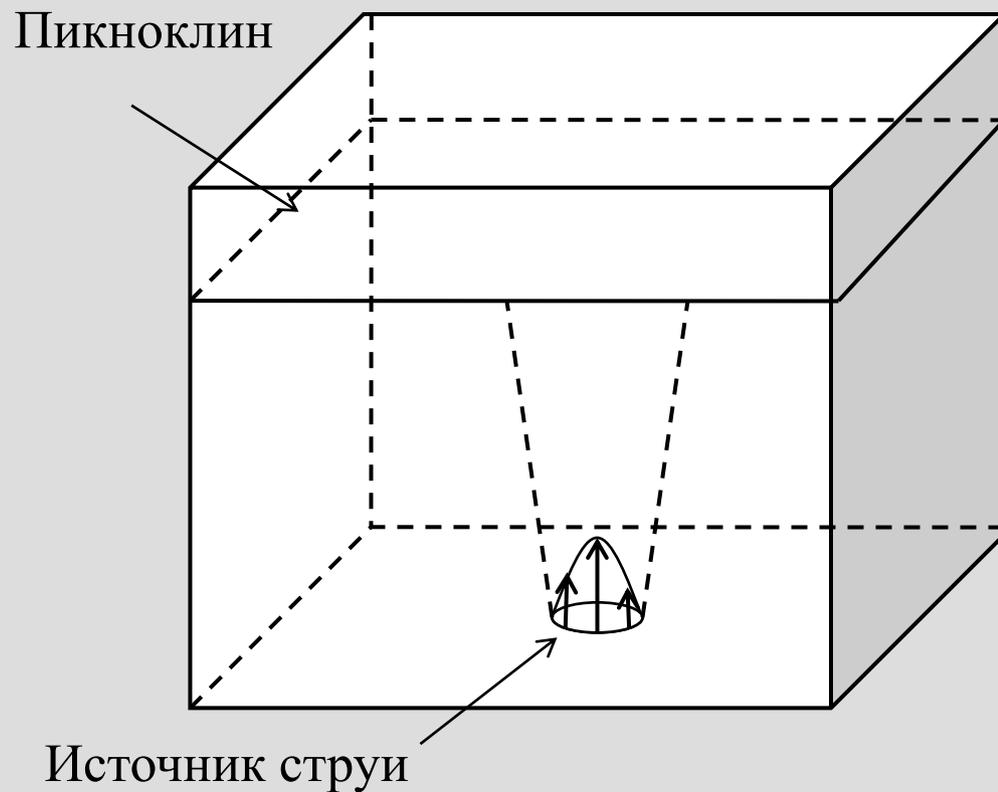


Интегральные масштабы



Течение носит сложный пространственно-временной характер, тип которого может быть определен анализом масштабов течения.

Взаимодействие затопленной струи с пикноклином



Профиль плотности

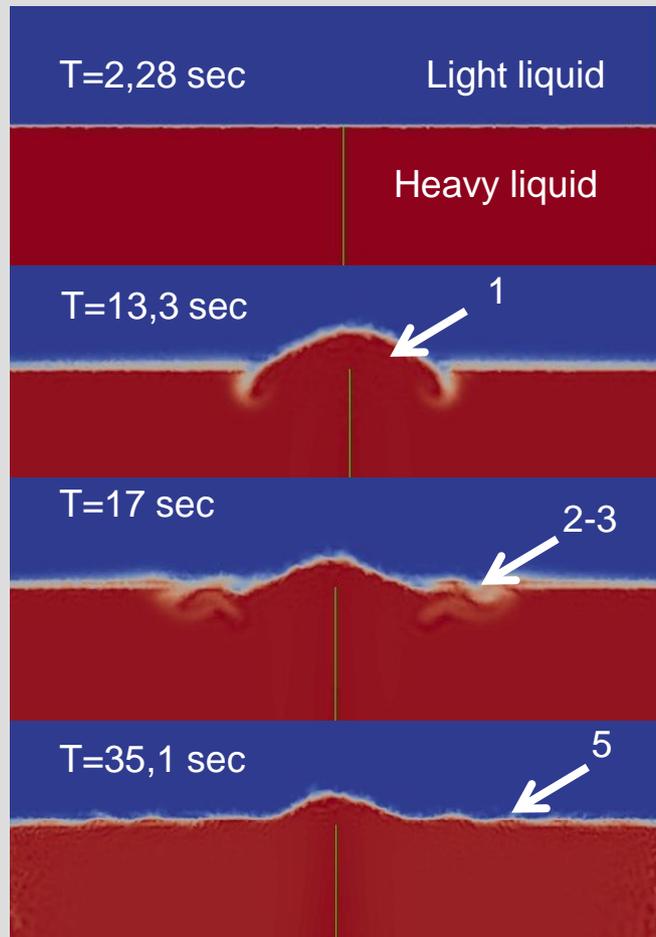
Число Рейнольдса
Число Фруда

2548
0,64

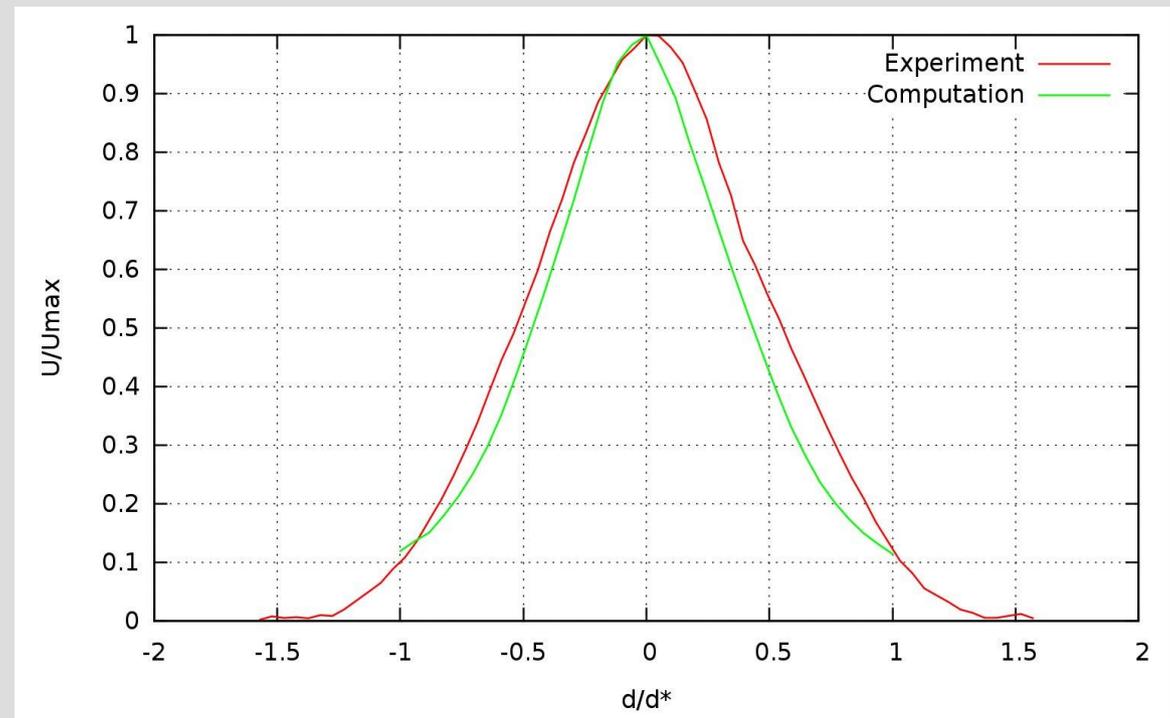
8 млн. расч. ячеек

Взаимодействие затопленной струи с пикноклином

FlowFES, LES, MF, 3D

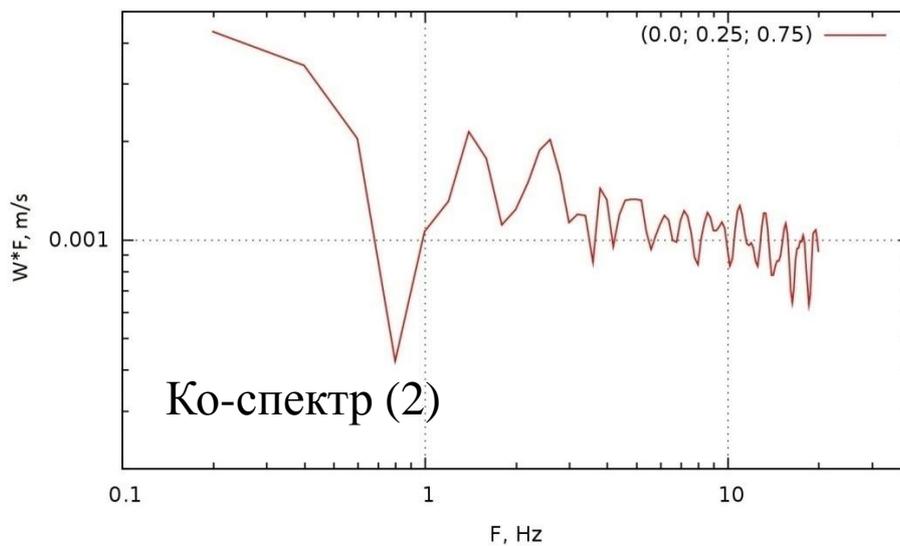
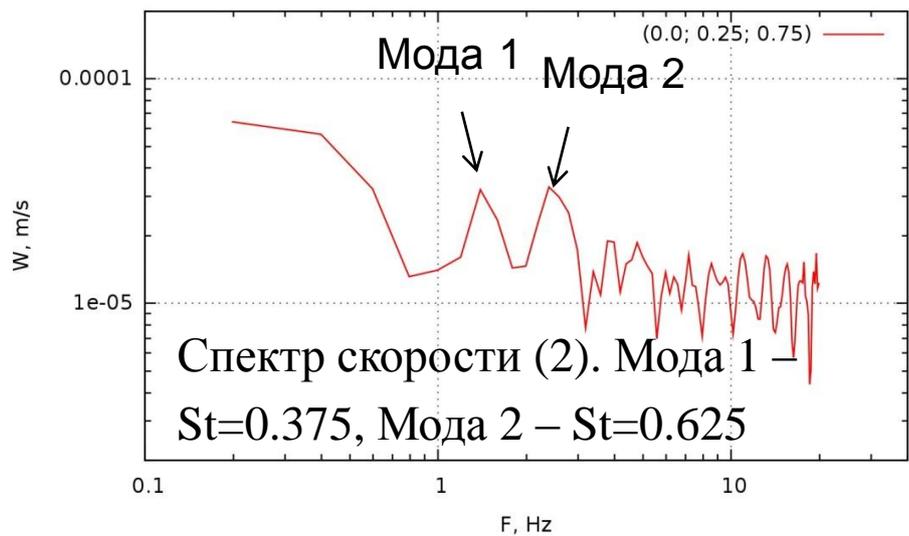
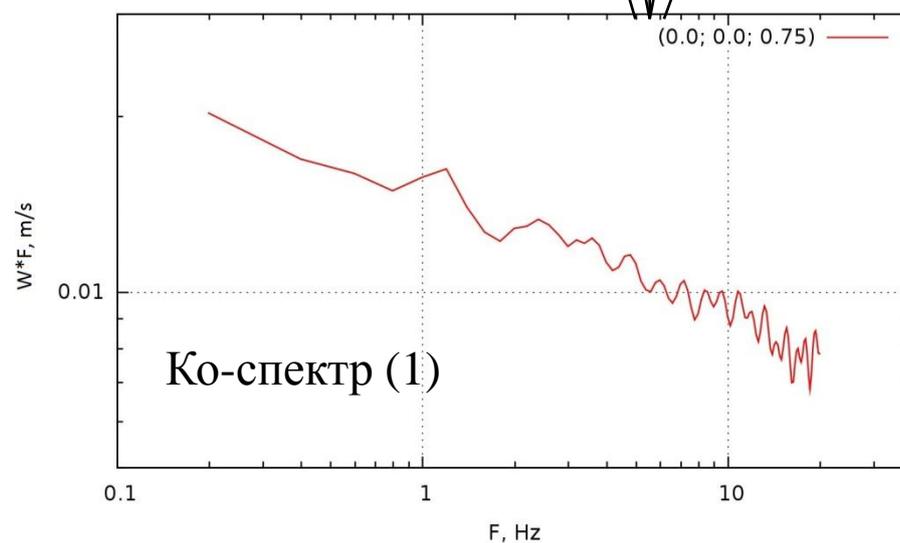
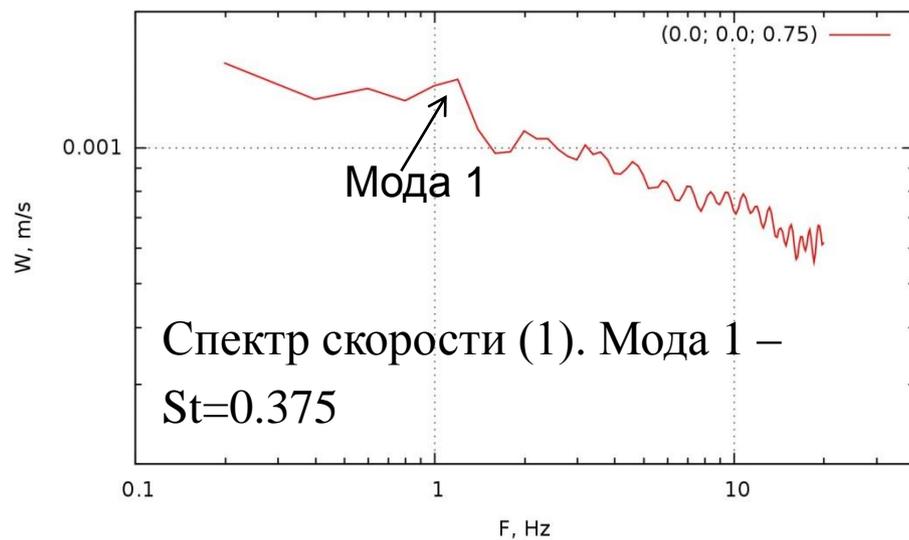
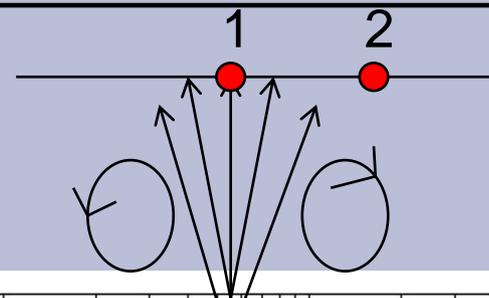


Безразмерное поле плотности



Осредненный по времени профиль скорости

Взаимодействие затопленной струи с пикноклином



Заключение

1. Внедрение суперкомпьютерных технологий (СТ) позволило перейти на качественно новый уровень решения задач корабельной гидродинамики.
2. СТ позволили снизиться затраты на лабораторный эксперимент.
3. СТ открывают возможности решения сопряженных задач.

Спасибо за внимание!

Математическая модель

- Уравнение неразрывности

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0$$

- Уравнения Навье-Стокса

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\nu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \tau_{ij}^{SGS} \right] - \frac{1}{\rho_a} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + g_i \frac{(\rho - \rho_0)}{\rho_a}$$

- Уравнение переноса скаляра (объемной фракции жидкости VOF)

$$\frac{\partial \bar{f}}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{f}}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[D \left(\frac{\partial \bar{f}}{\partial x_j} \right) - J_j^{SGS} \right]$$

$$\frac{\partial \bar{f}}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{f}}{\partial x_j} = 0$$

- Модели турбулентности

- URANS: k - ϵ , SST, RSM, ...

- LES: Smagorinsky, Dynamic Smagorinsky, Dynamic Mixed

Reynolds averaging (URANS):

$$\bar{\varphi}(\vec{x}, t) = \frac{1}{T} \int \varphi(\vec{x}, t) dt$$

Space filtering (LES):

$$\bar{\varphi}(\vec{x}, t) = \iiint_{\infty} \varphi(\vec{x} - \vec{s}, t) F(\vec{s}) d\vec{s}$$

Математическая модель

- Результирующая сила

$$\vec{F} = \vec{P} + \vec{F}_A + \vec{F}_p$$

- Момент

$$\vec{M}_C = \vec{M}_C^A + \vec{M}_C^p$$

- Уравнения движения твердого тела

$$\left. \begin{aligned} m\ddot{X}_C &= F_X = F_{pX} \\ m\ddot{Y}_C &= F_Y = F_{pY} \\ m\ddot{Z}_C &= F_Z = mg - F_A + F_{pZ} \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} J_x \dot{\omega}_x + (J_z - J_y) \omega_z \omega_y &= M_x \\ J_y \dot{\omega}_y + (J_x - J_z) \omega_x \omega_z &= M_y \\ J_z \dot{\omega}_z + (J_y - J_x) \omega_y \omega_x &= M_z \end{aligned} \right\}$$