



САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ МОРСКОЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

# Высокопроизводительные вычисления в задачах судостроения

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

# Введение

## Задачи корабельной гидродинамики:

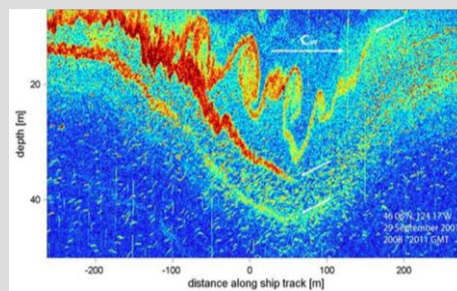
- Внешняя задача (обтекание тел);
- Волновые движения жидкости (поверхностные и внутренние волны);
- Геофизические течения;
- Внутренняя задача (течения в корабельных системах и трубопроводах);



# 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.

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & a_{nn} \end{bmatrix}$$



# Опыт использования высокопроизводительных вычислений в задачах судостроения

## *В учебном процессе:*

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

## *В научных исследованиях:*

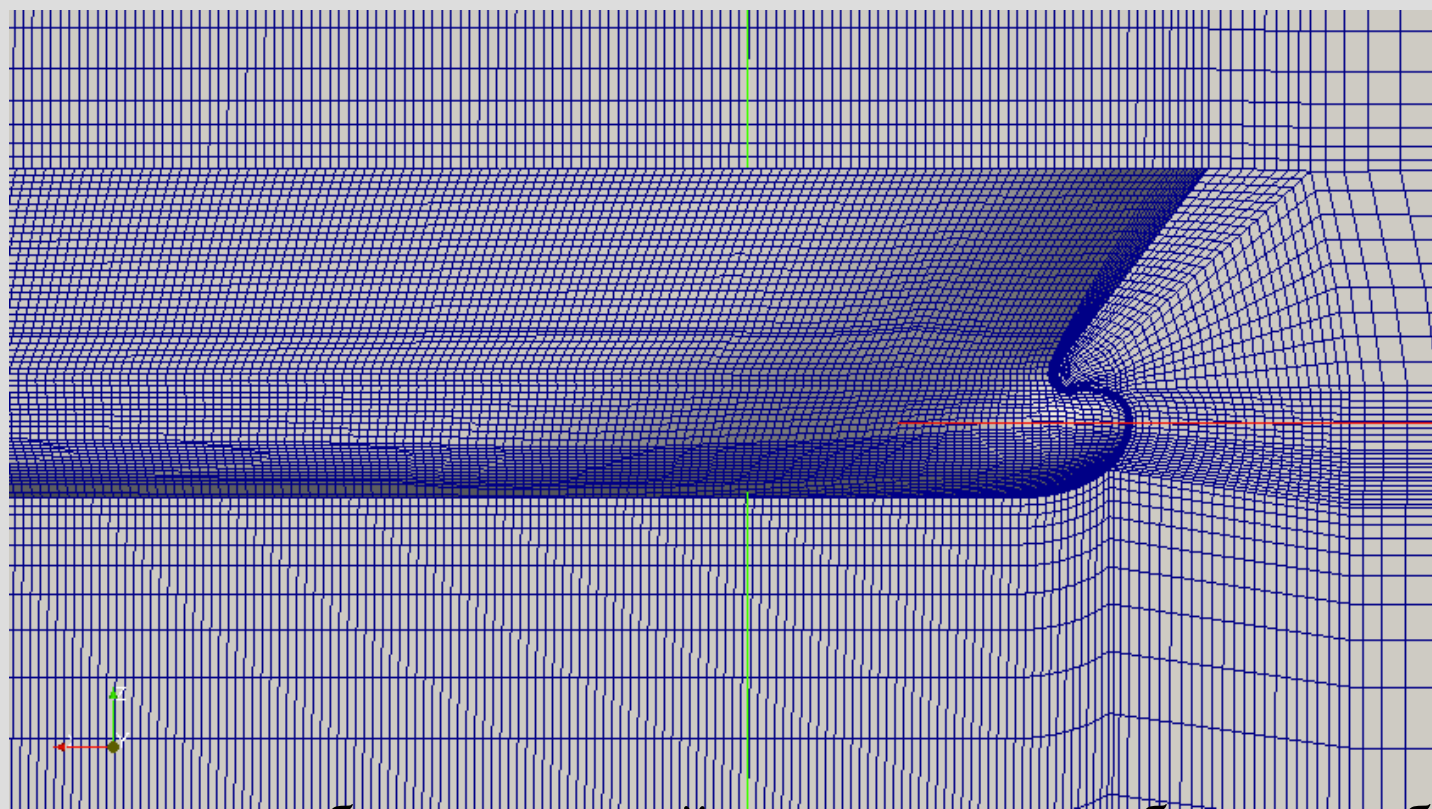
Подготовка кандидатских (4) и докторских диссертаций (1);  
Выполнение НИР и НИОКР;  
Совместные исследования с партнерами: ИСП РАН, РНЦ КИ,  
ИО РАН, ИПФ РАН, МГУ, МГТУ им. Н.Э. Баумана,  
СПбГПУ, ВМИИ.

## *В промышленных расчетах:*

ЦНИИ им. ак. А.Н. Крылова, СПКБ.

# Построение «больших» сеток

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



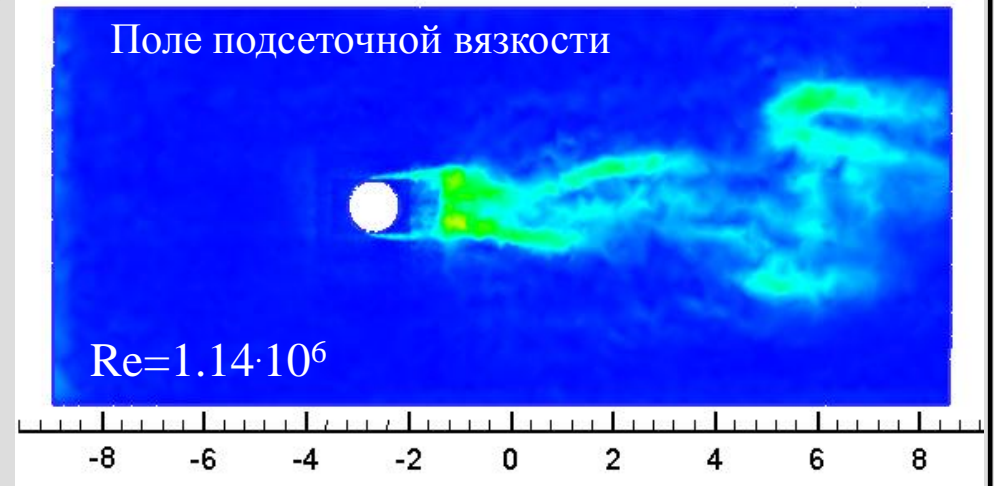
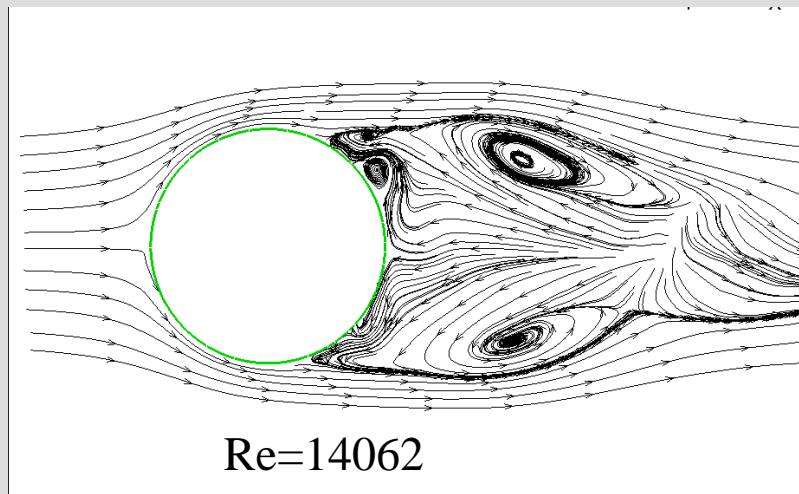
Сгущение сетки: вблизи твердой поверхности, вблизи свободной поверхности.

# Моделирование внешнего обтекания тел



# Обтекание сферы потоком однородной ЖИДКОСТИ

- Моделирование отрывных течений
- ГУ: скорость + ГСЧ, пристеночные функции, давление на выходе

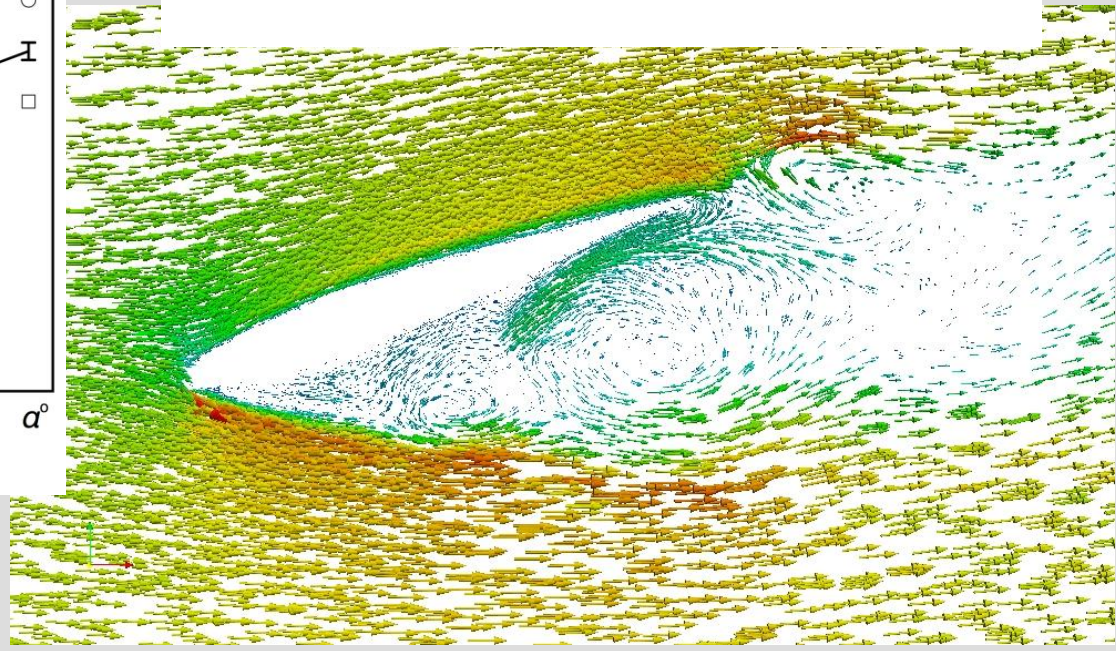
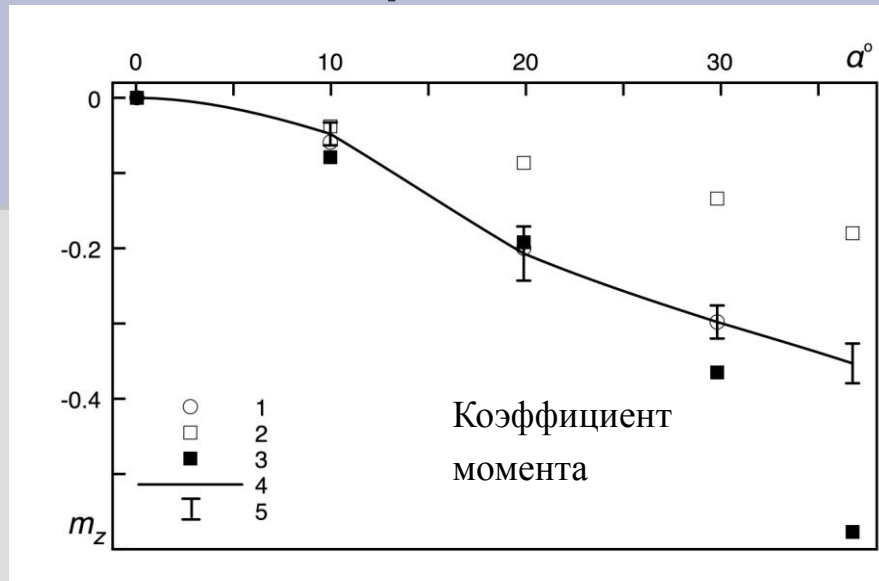
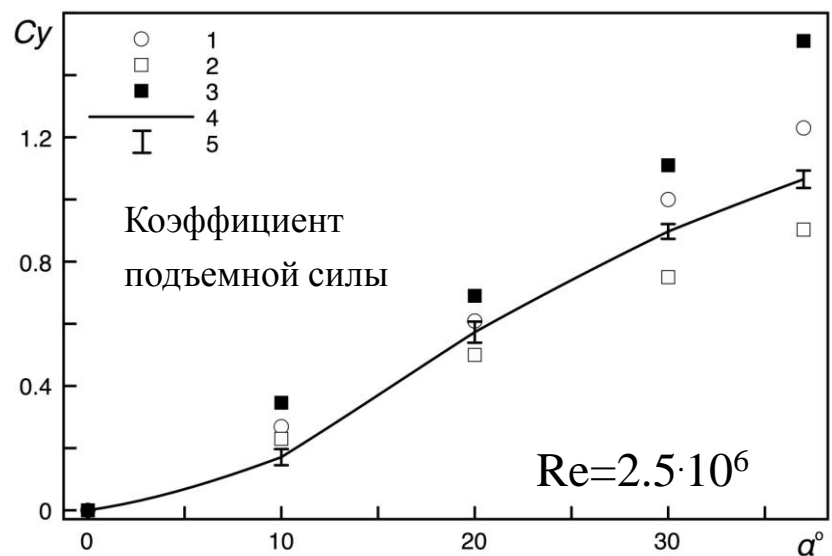
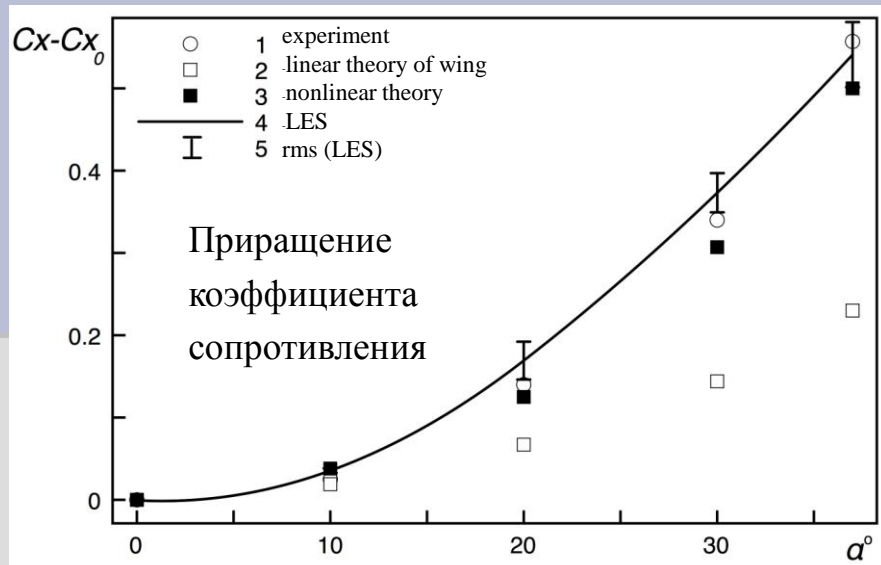


Re	$C_D^{calc.}$	$C_D^{exp}$
14062	0.36	0.4
1140000	0.179	0.12-0.18

LES-Smagorinsky,  
3D, сфера, 3 млн. расч. ячеек

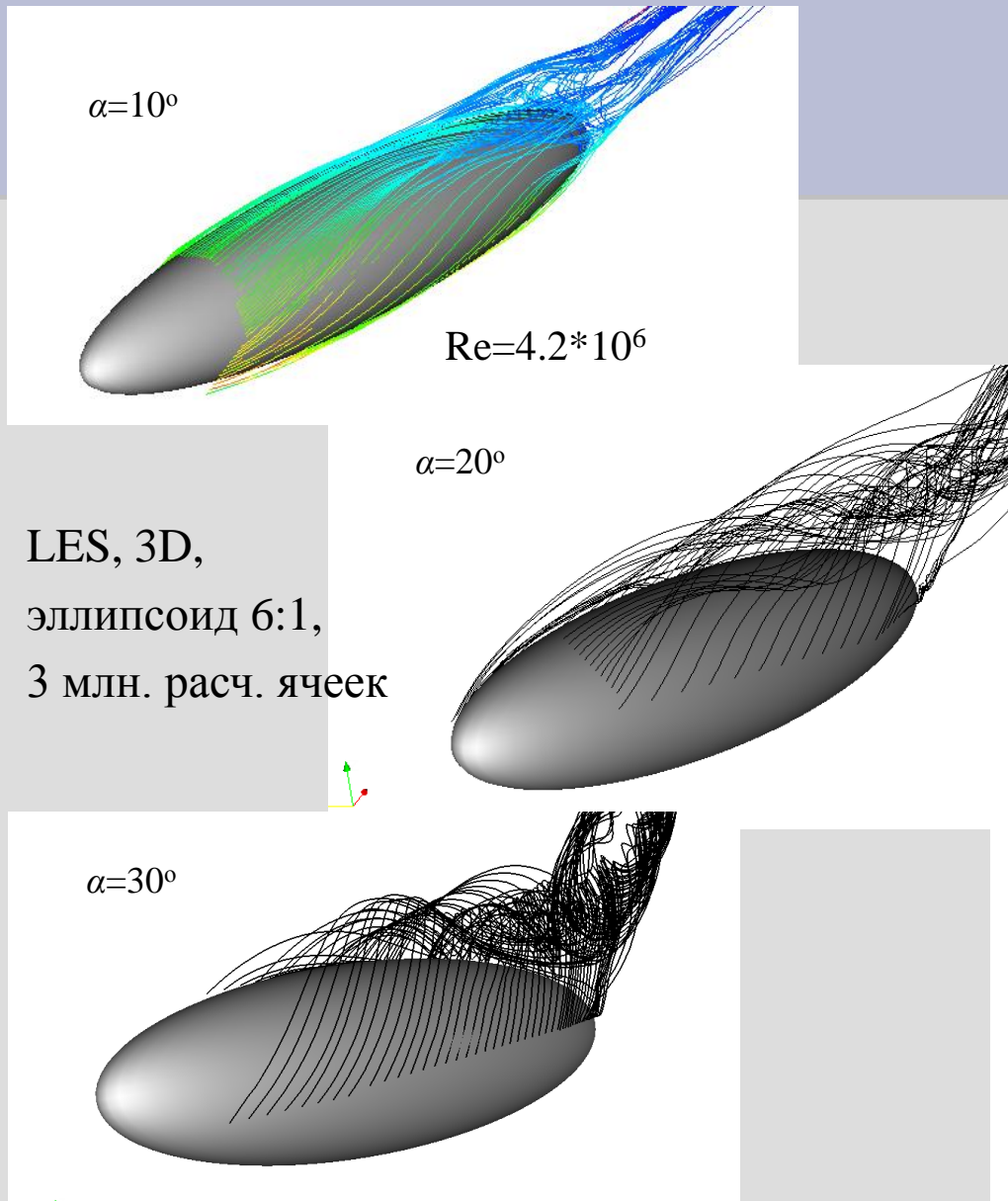


# Обтекание крыла малого удлинения потоком однородной жидкости

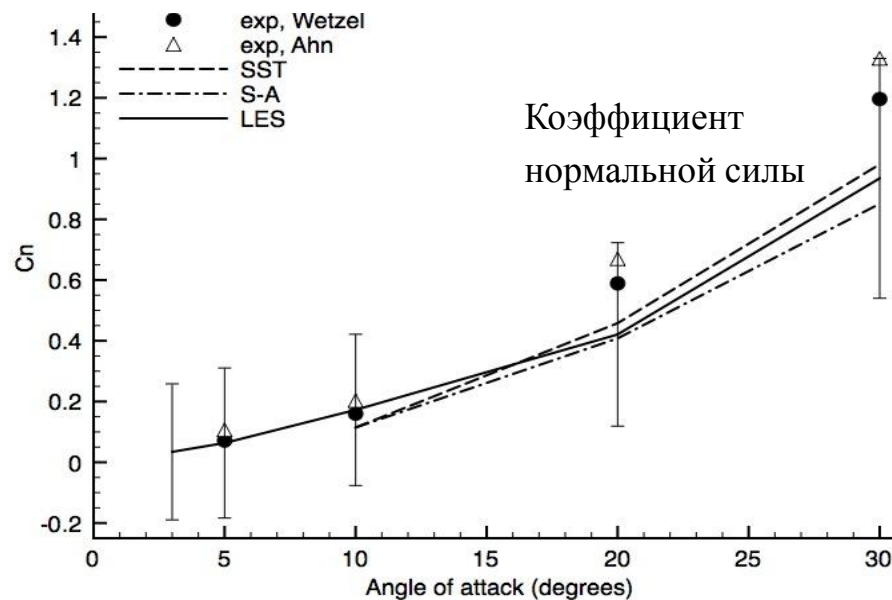
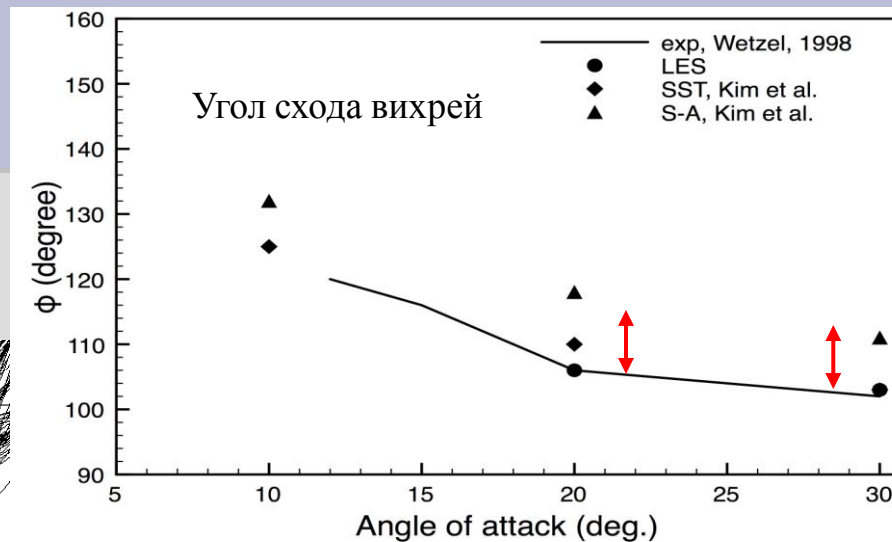


LES, 3D, NASA 0018, Удлинение 1, 20 млн. расч. ячеек

# Обтекание эллипсоида вращения однородным потоком

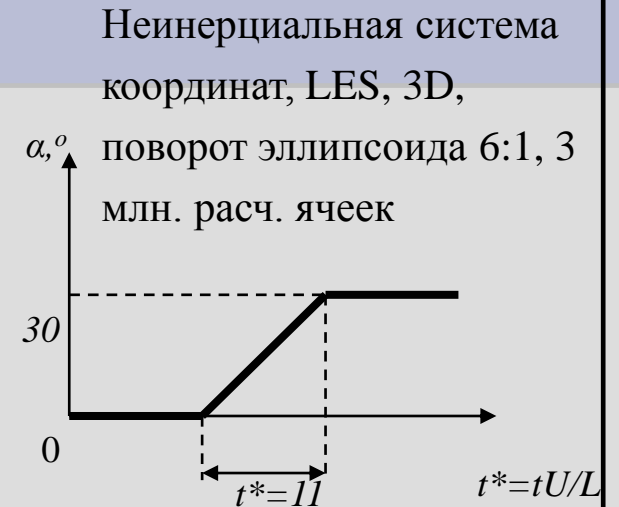
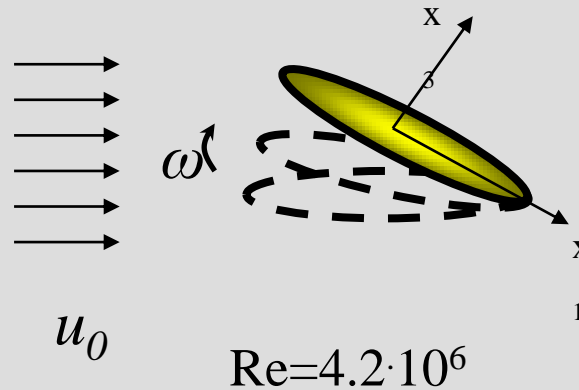
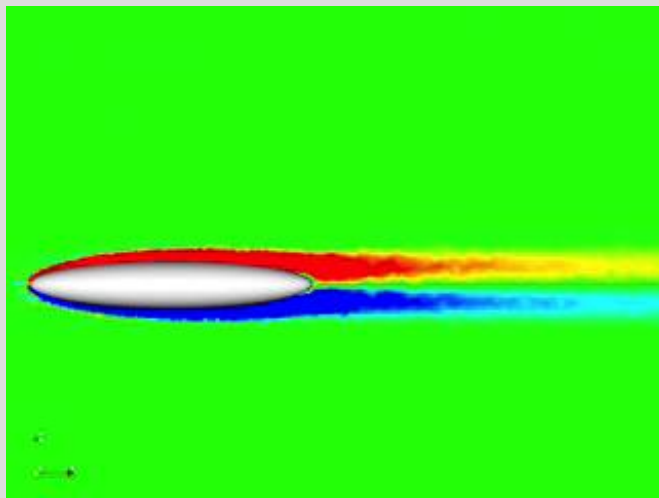


LES, 3D,  
эллипсоид 6:1,  
3 млн. расч. ячеек

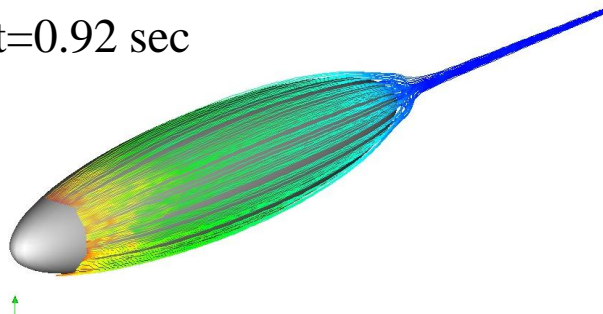


# Обтекание эллипсоида вращения, совершающего поворот

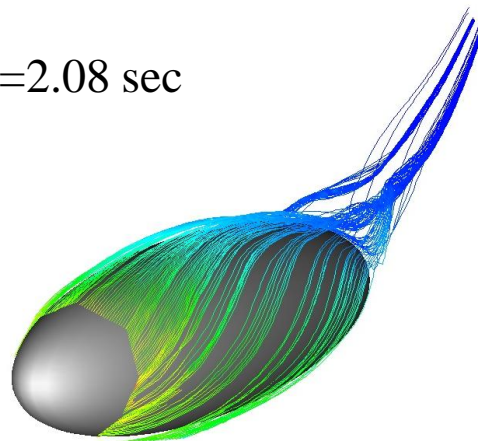
Завихренность



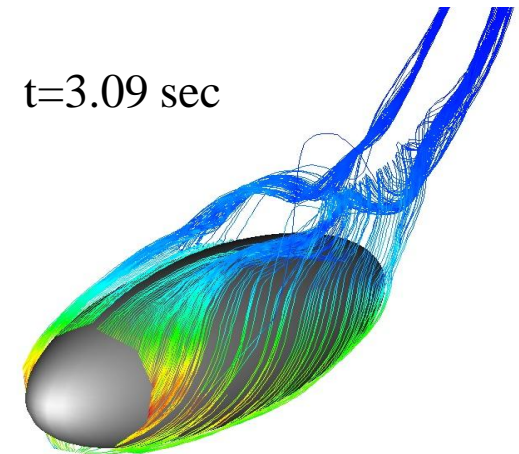
t=0.92 sec



t=2.08 sec

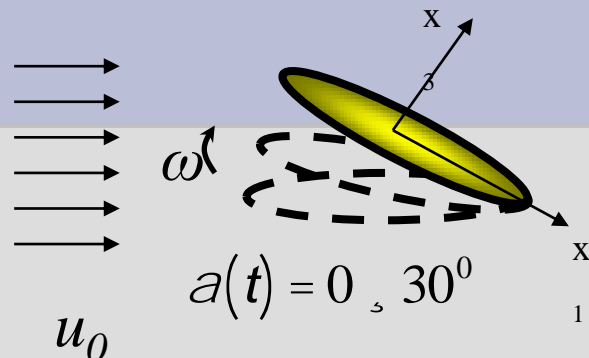


t=3.09 sec



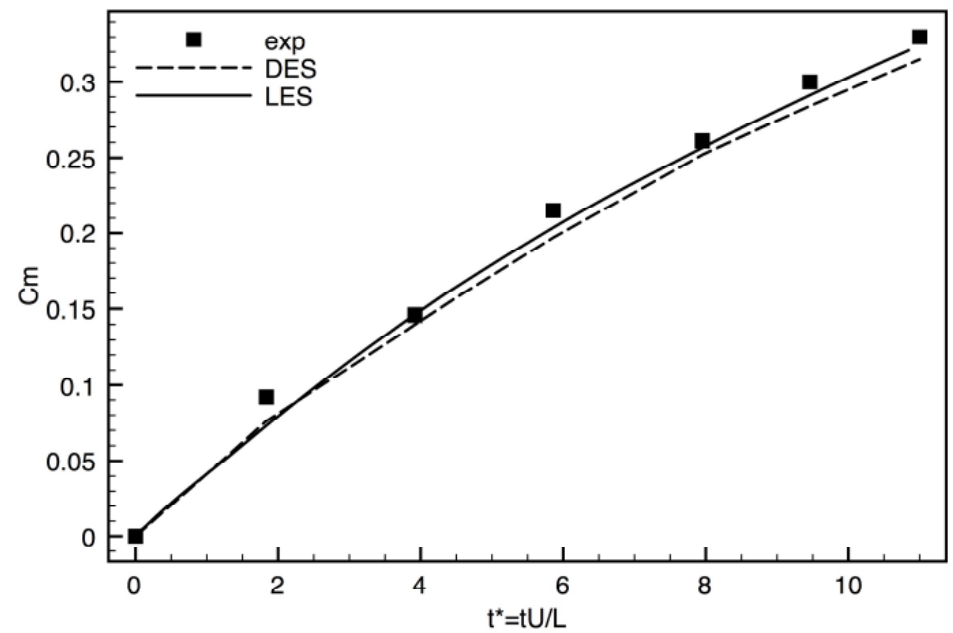
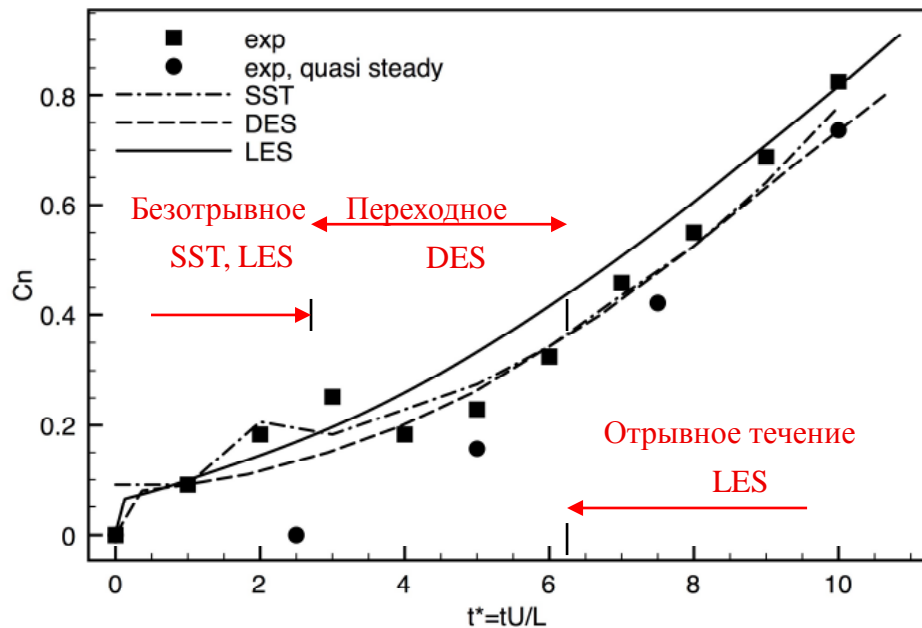
Траектории движения жидких частиц

# Обтекание эллипсоида вращения, совершающего поворот



$Re = 4.2 \cdot 10^6$

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



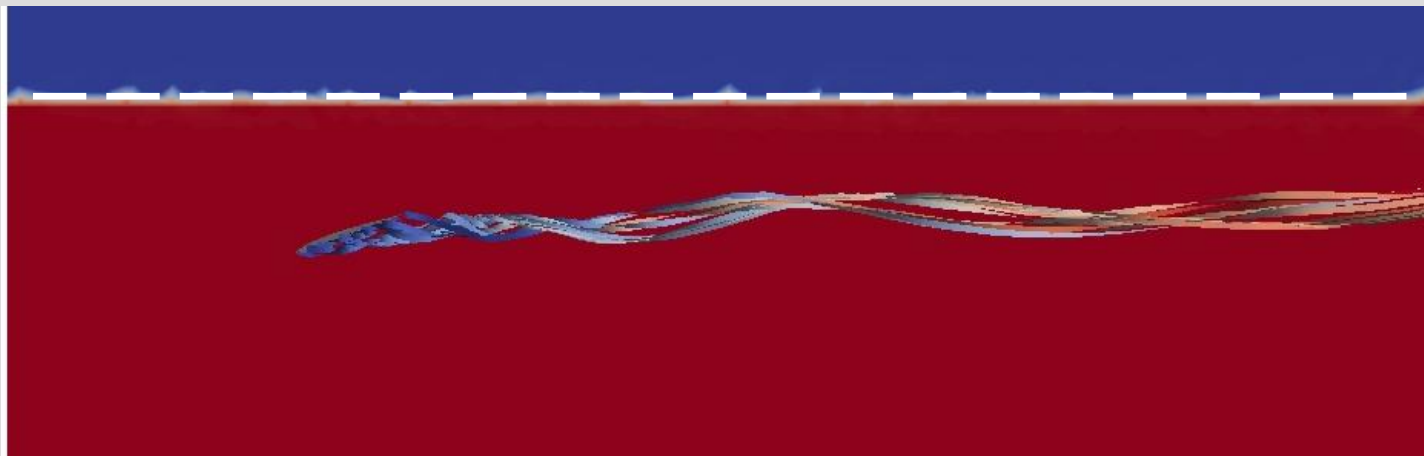
Эволюция нормального коэффициента силы  $C_n$  и коэффициента момента  $C_m$ .

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

# Моделирование течений со свободной поверхностью

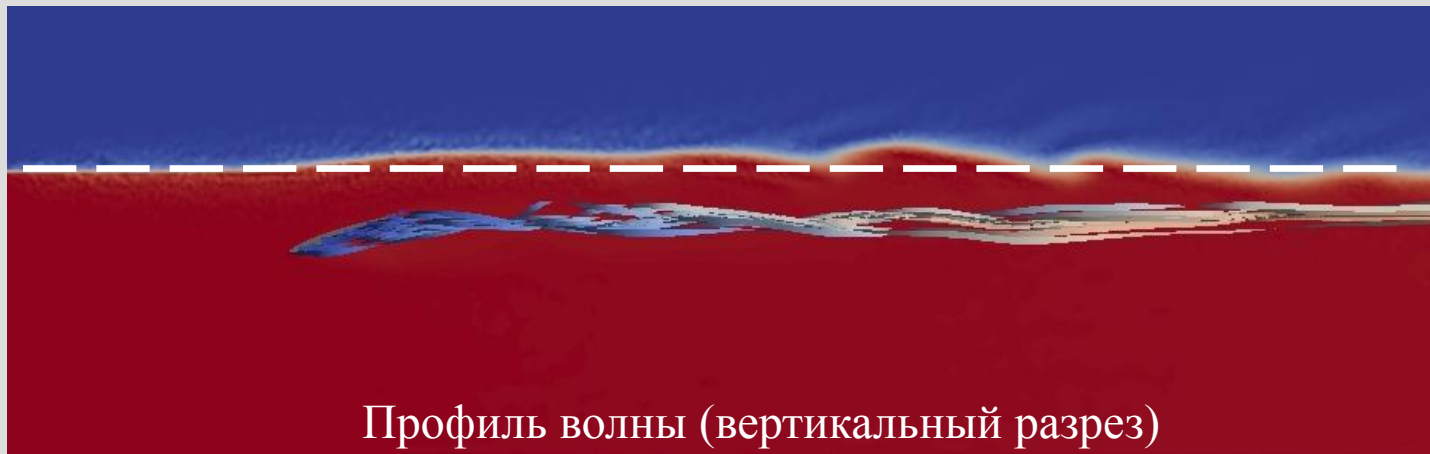


# Движение крапа малого удлинения под свободной поверхностью



*Крыло:*  
*ВQM 34, удлинение 1.2*

$Re=313000$ ,  $Fr=0.1$ ,  
 $h=1.1b$

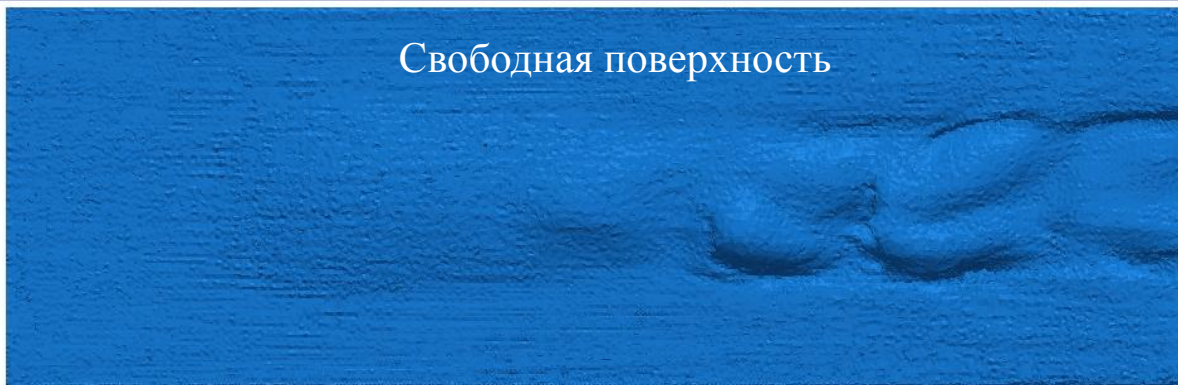


Профиль волны (вертикальный разрез)

$Re=8313000$ ,  $Fr=2.65$ ,  
 $h=0.5b$

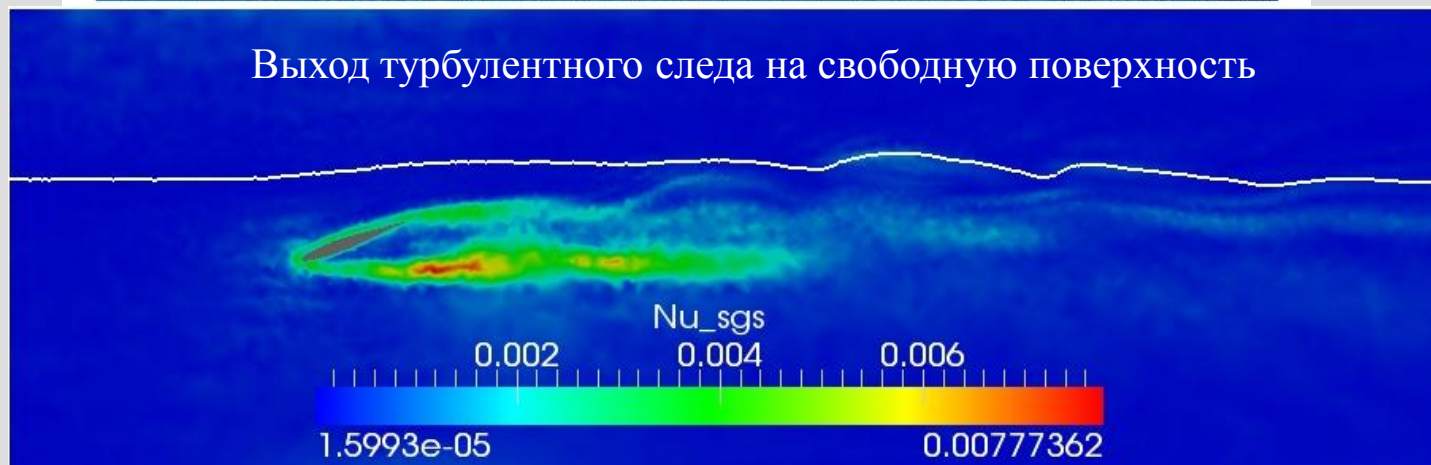
*LES, Smagorinsky,*  
*VoF, 3 млн. Ячеек,*  
*Кластер СПбГМТУ*

Свободная поверхность

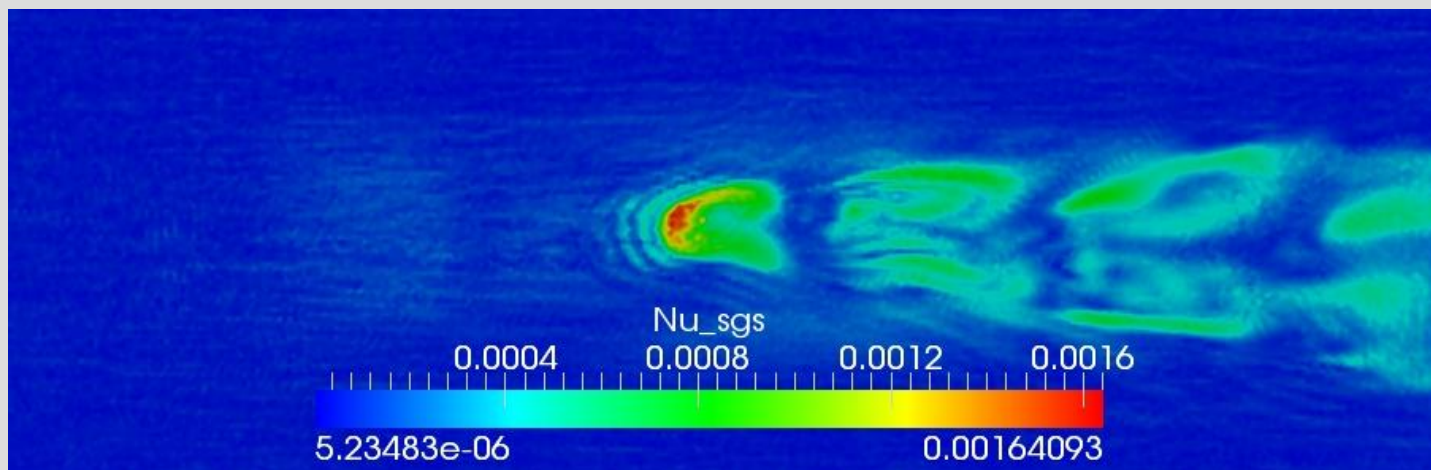


Устойчивую во  
времени  
дугообразная форма  
волны

Выход турбулентного следа на свободную поверхность



← Вид сбоку

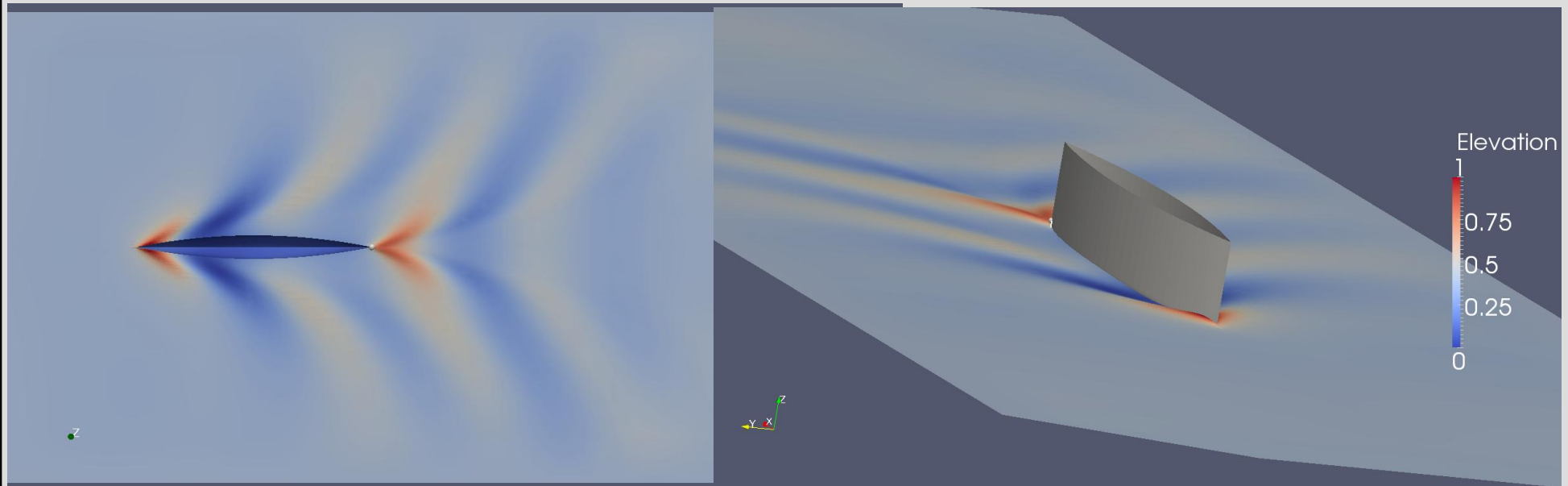


← Вид  
сверху

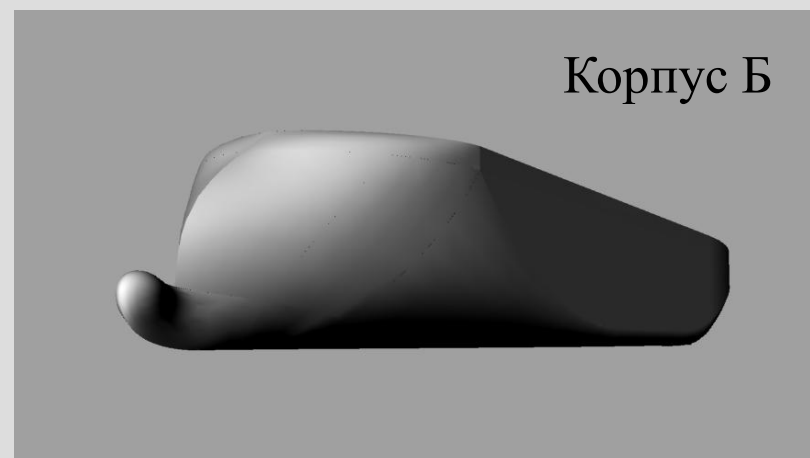
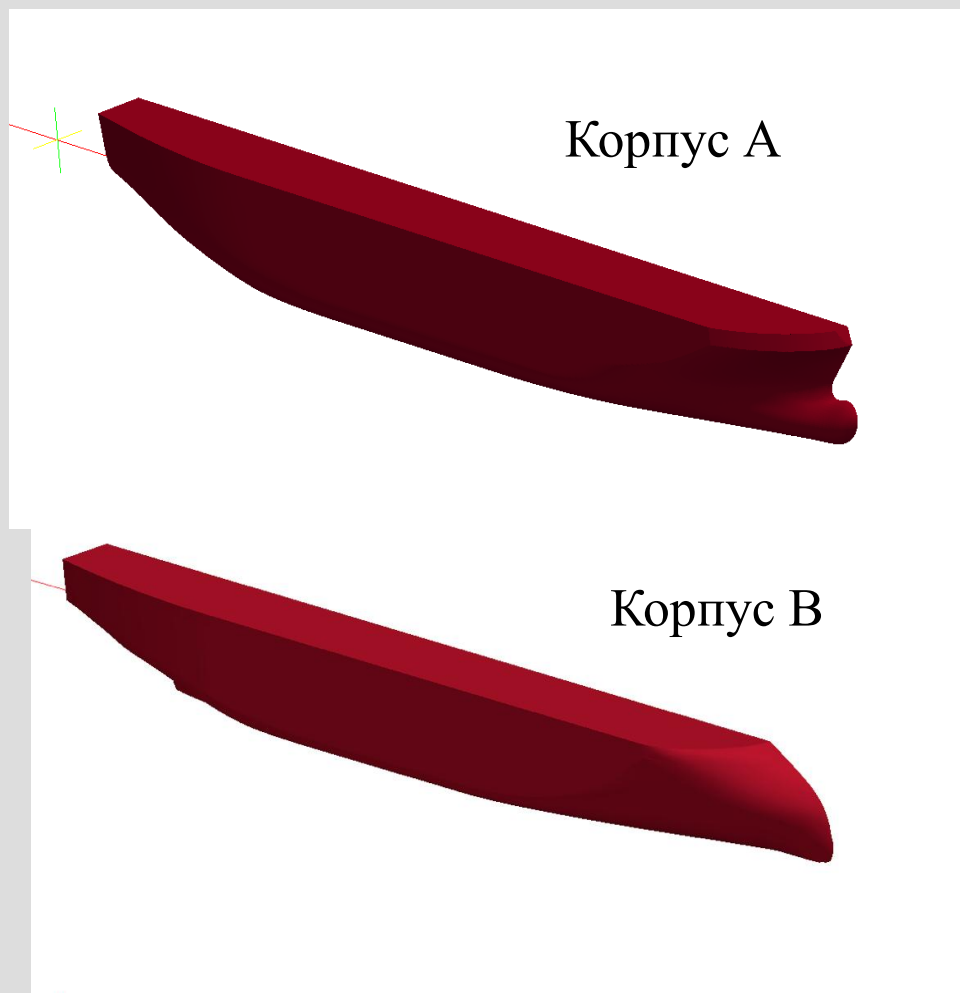


# Тело Wigley

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

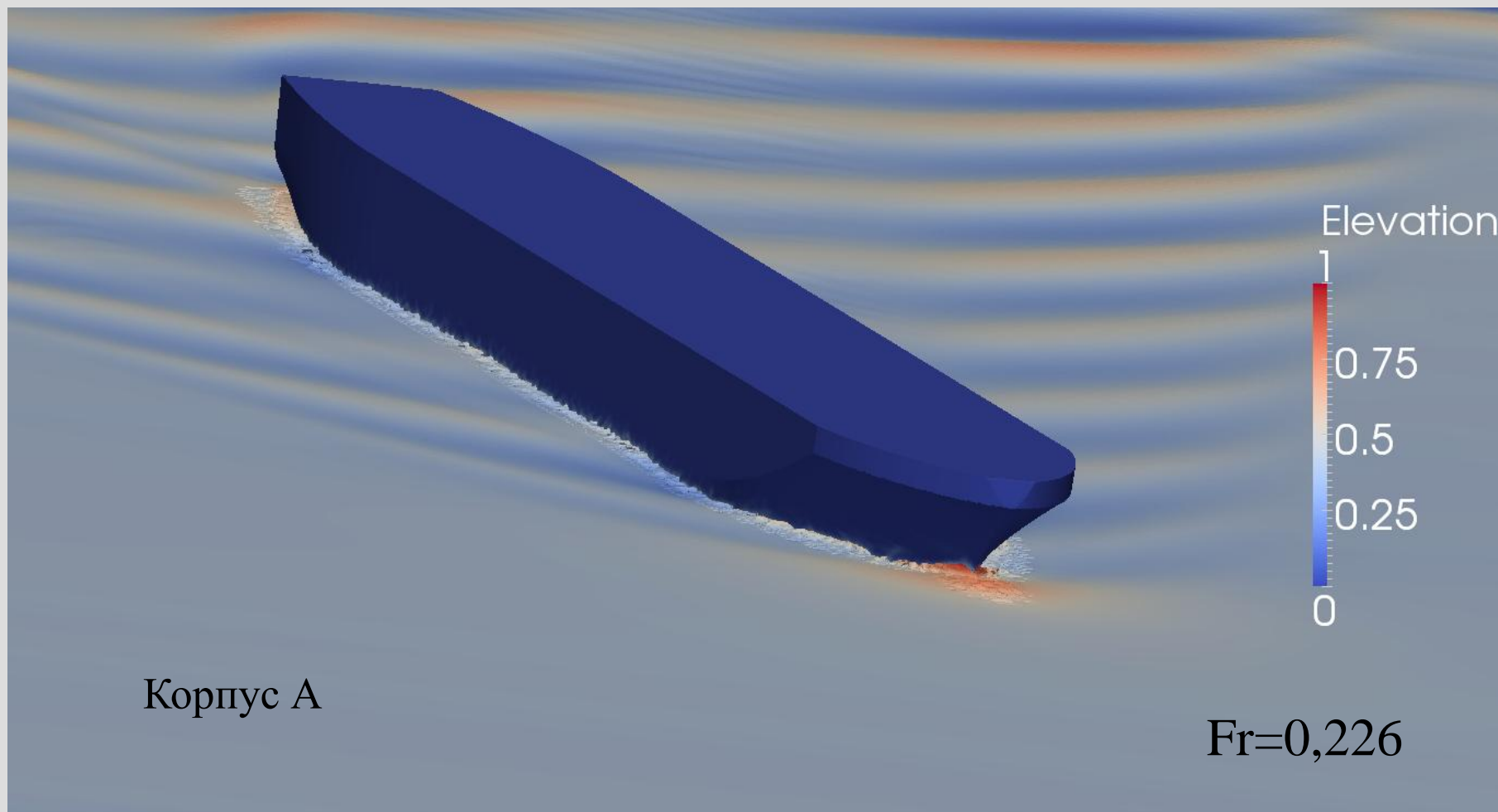


# Усовершенствование формы НОСОВОЙ ОКОНЕЧНОСТИ

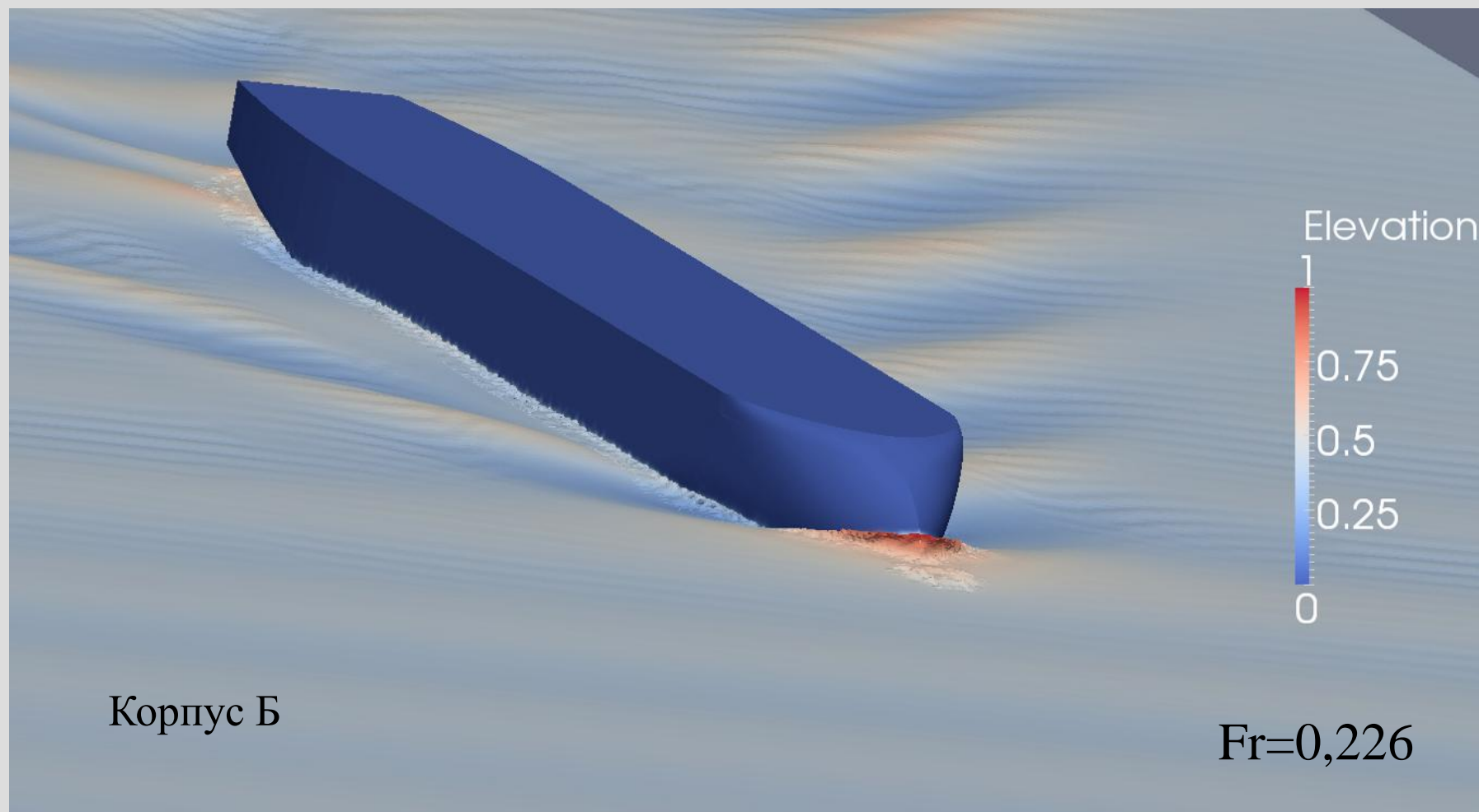


А – традиционная носовая оконечность;  
Б – облегченный корпус;  
В – облегченный корпус ледового класса.

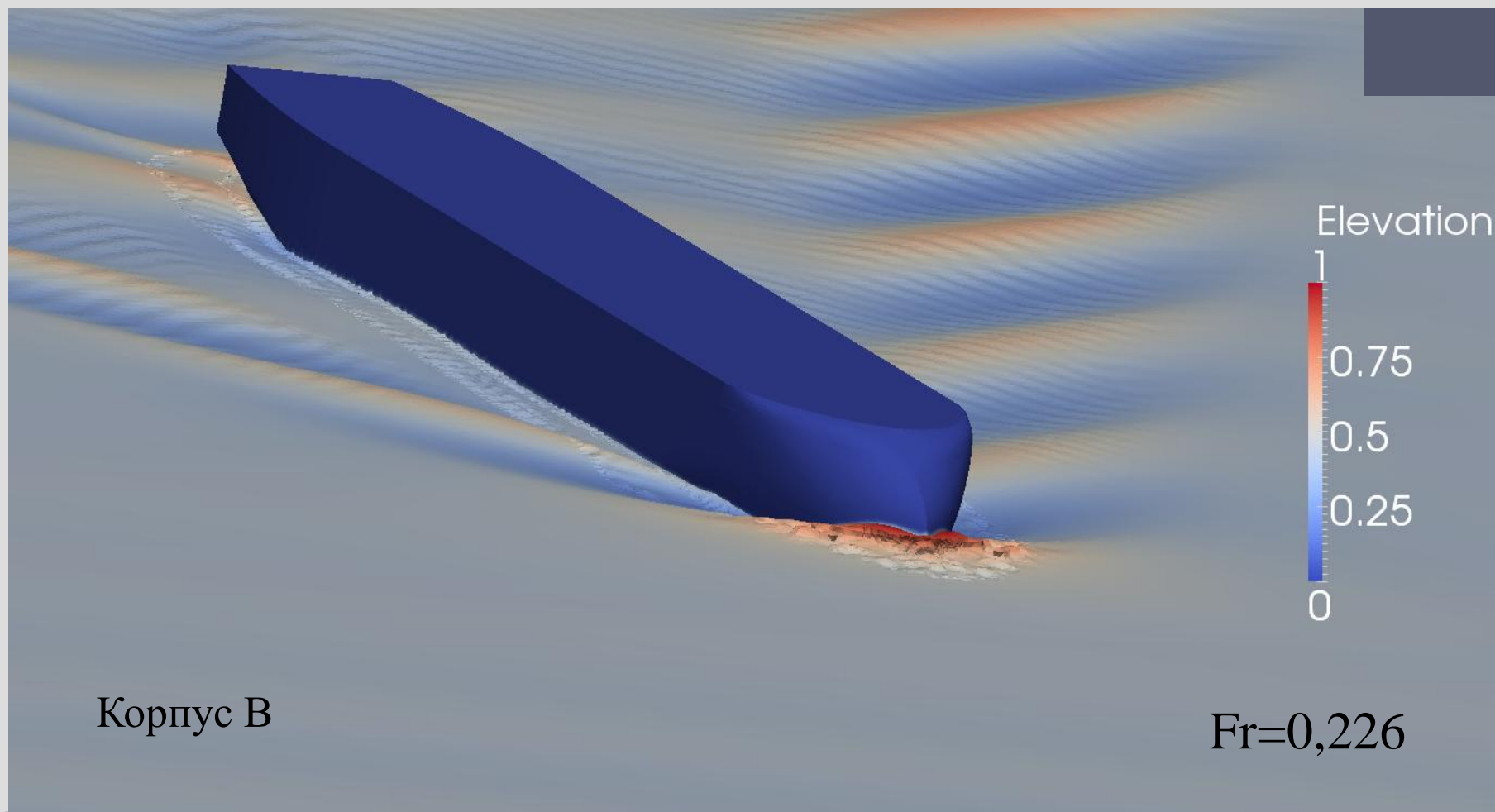
# Усовершенствование носовой оконечности



# Усовершенствование носовой оконечности



# Усовершенствование носовой оконечности

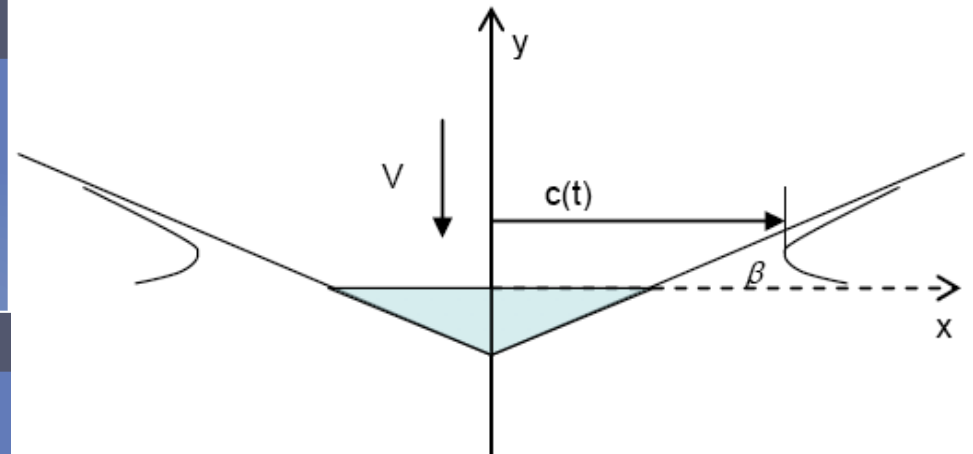
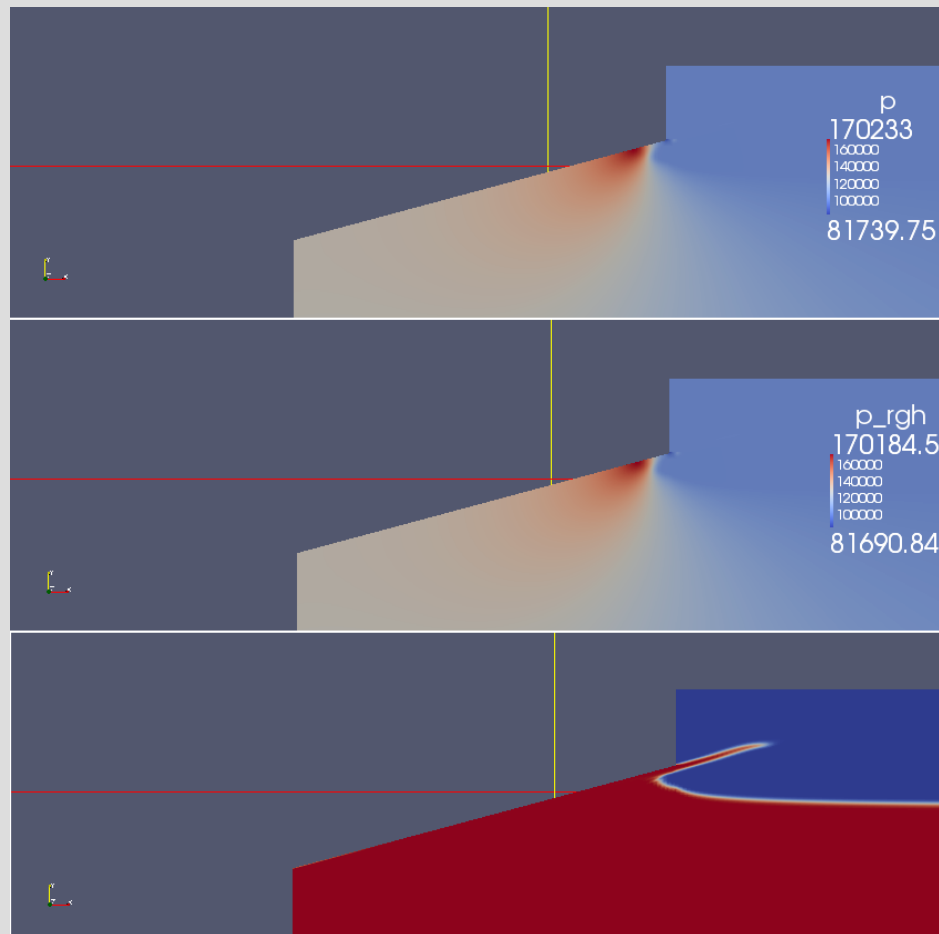


# Усовершенствование носовой оконечности



Корпус В

# Слеминг: падение клина в жидкость



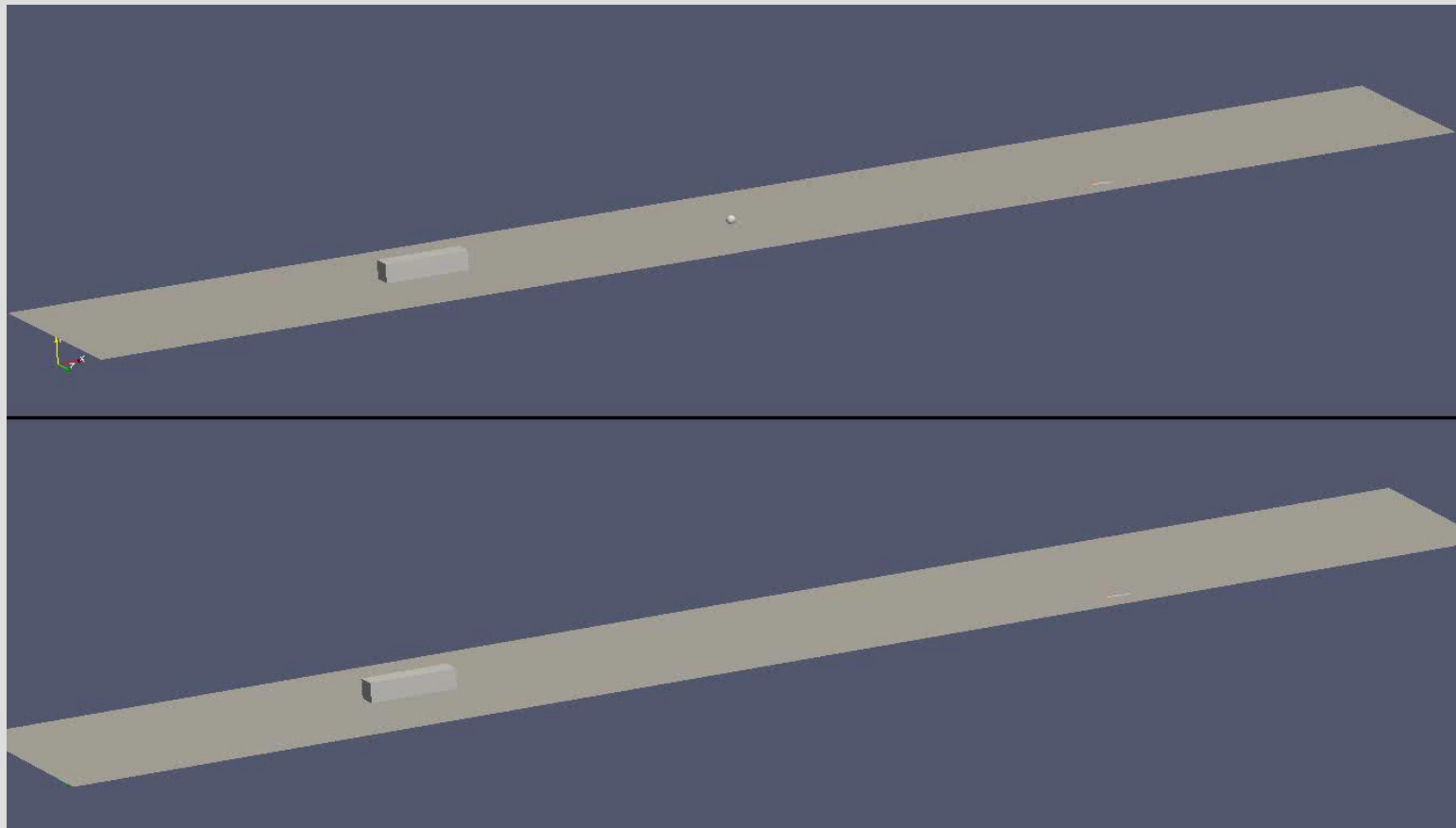
Поле давления, поле избыточного давления и положение свободной поверхности. Момент времени  $t=0.04$  с

OpenFOAM, InterDyMFOAM, 2D



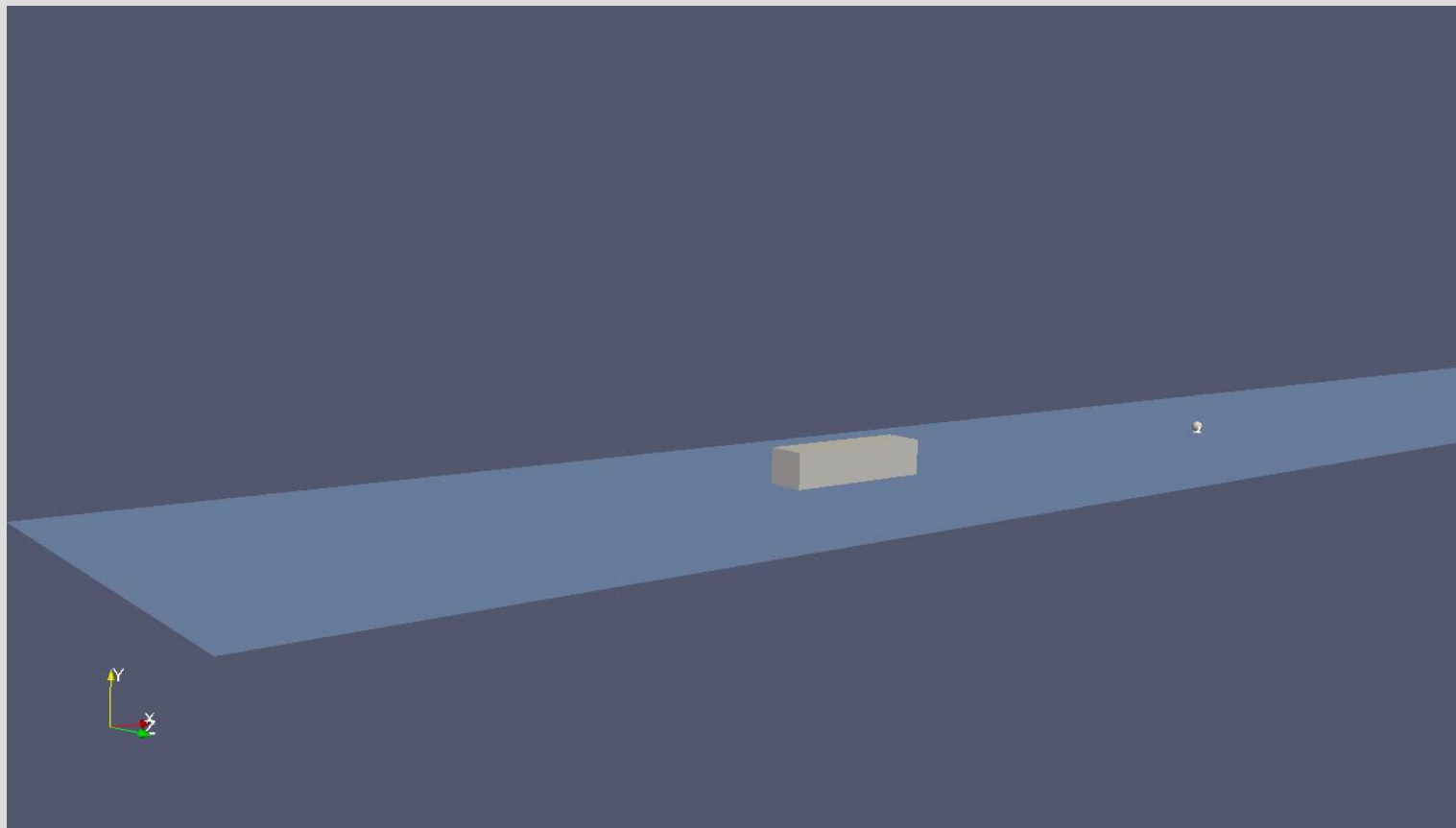
# Движение тела на волнении

- Влияние регулярного волнения на ГДХ тела



# Движение тела на волнении

- Взаимодействие тела с внешним волнением



# Моделирование геофизических течений

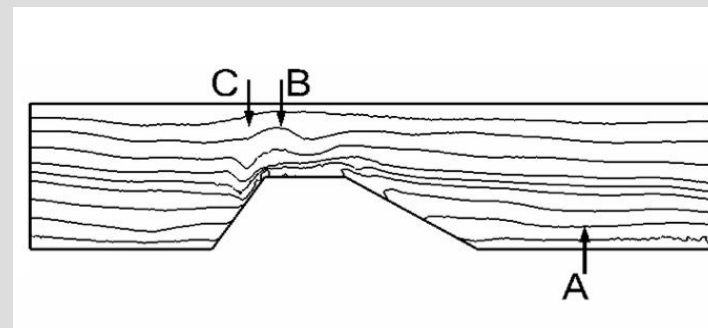
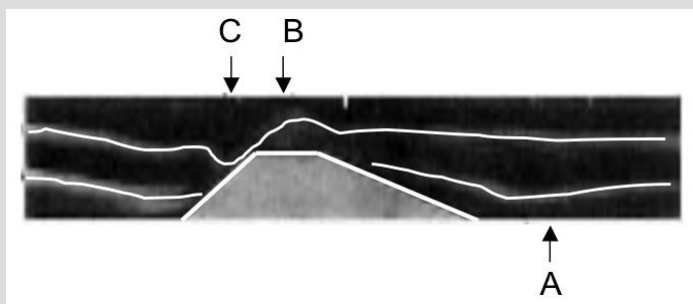
# Моделирование внутренних приливных волн

## ВОЛН

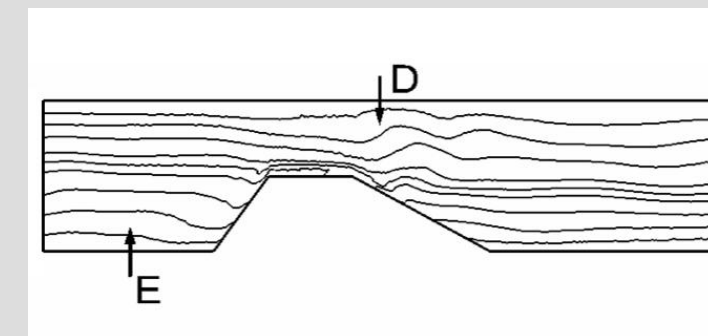
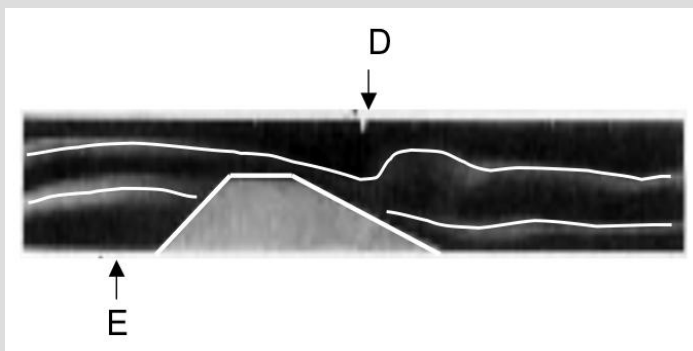
Внутренние приливные волны.

ГУ: вход/выход  $u(t)$ , условия прилипания, 2.5 млн. расч. ячеек.

$t=0.75T$

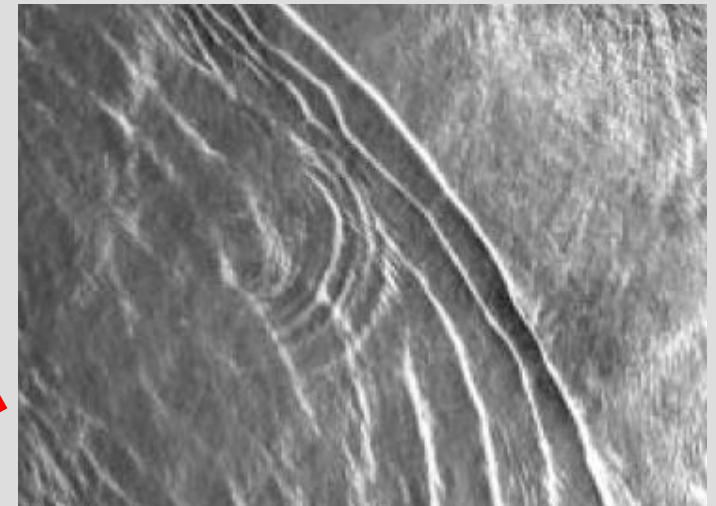
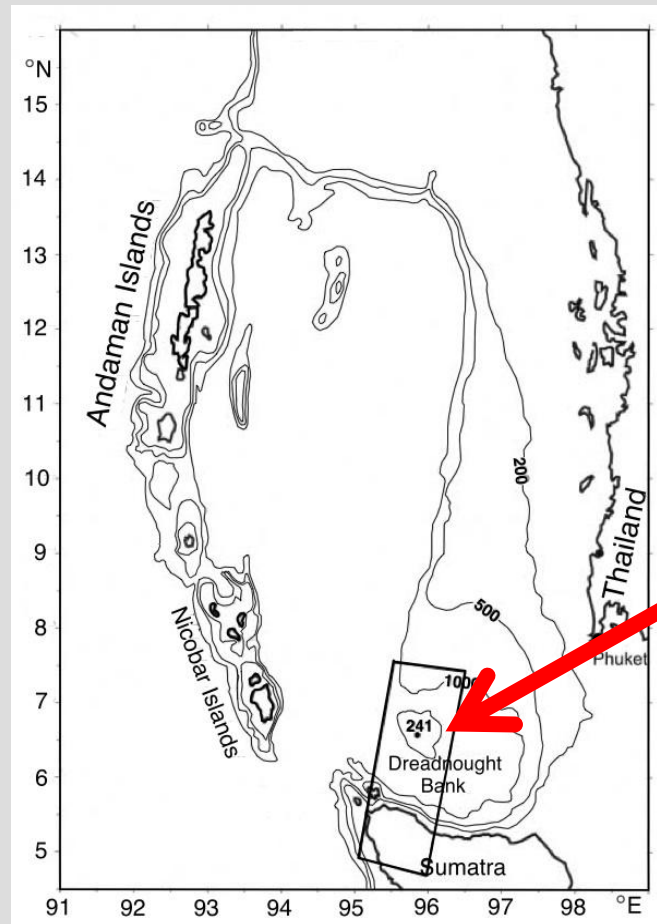


$t=1.5T$



Топология ВВ воспроизводится адекватно

# Моделирование внутренних приливных волн



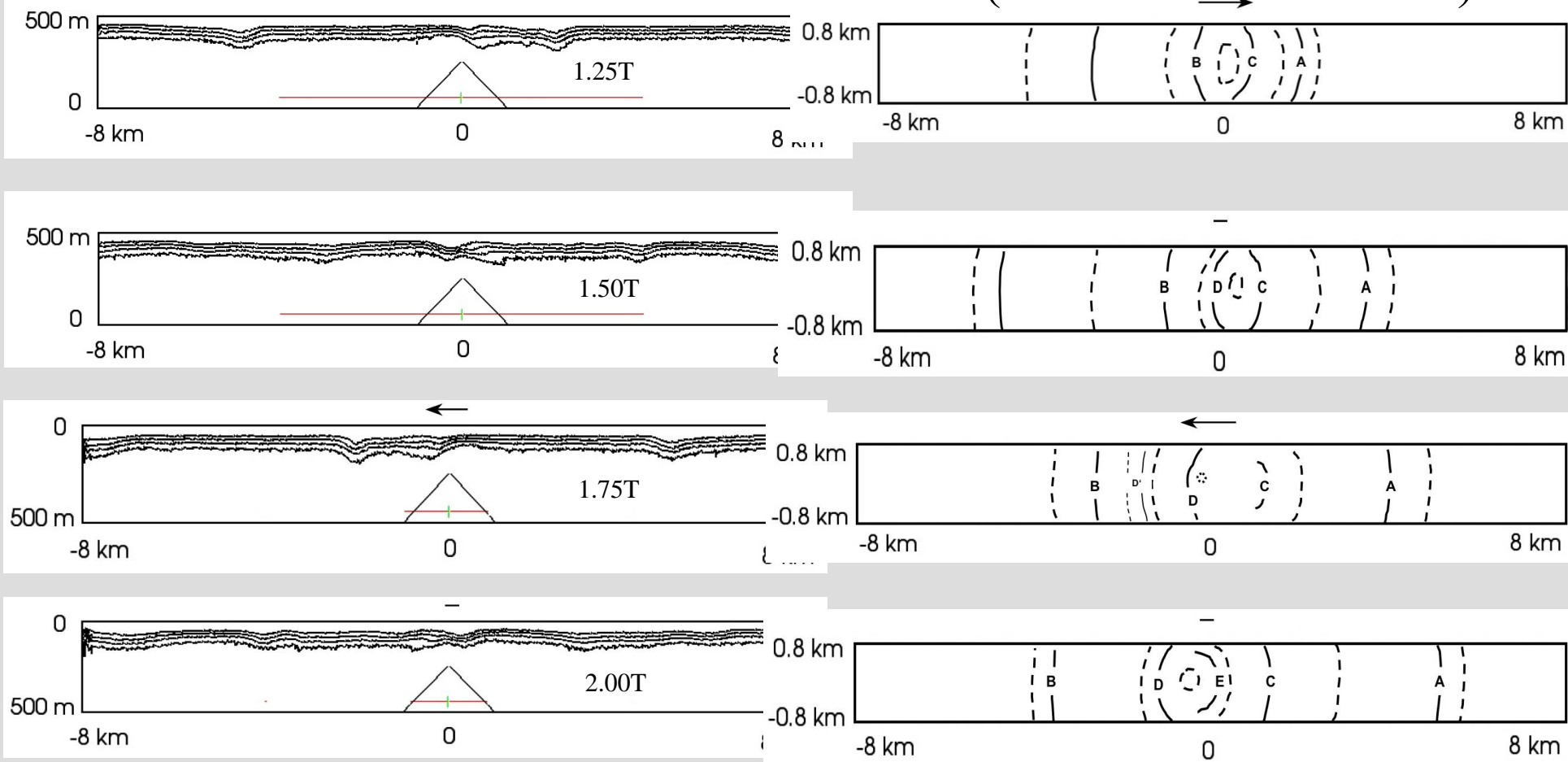
4 млн. расч. ячеек

# Моделирование внутренних приливных волн

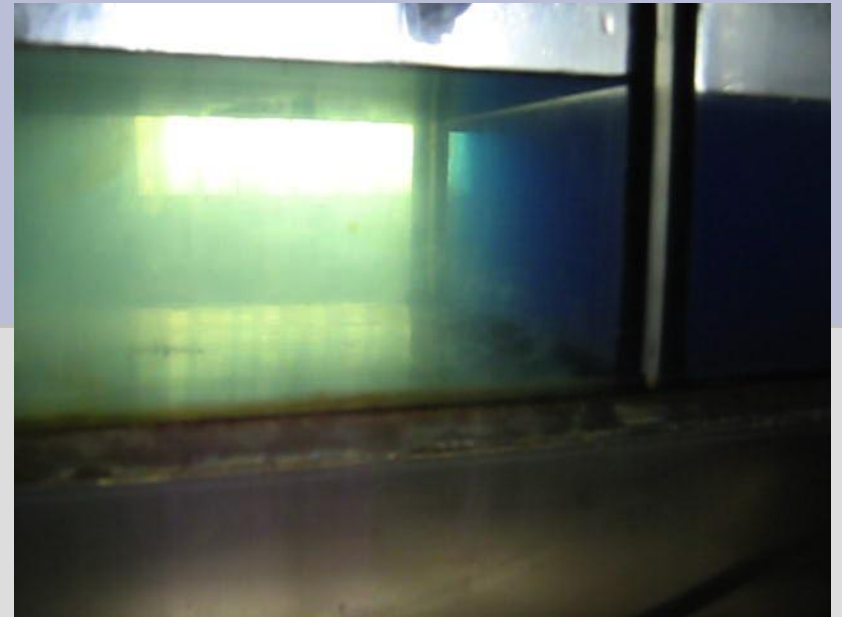
Поле плотности. Вертикальный разрез

Манифестация ВВ на СП

(вынос плотных масс)

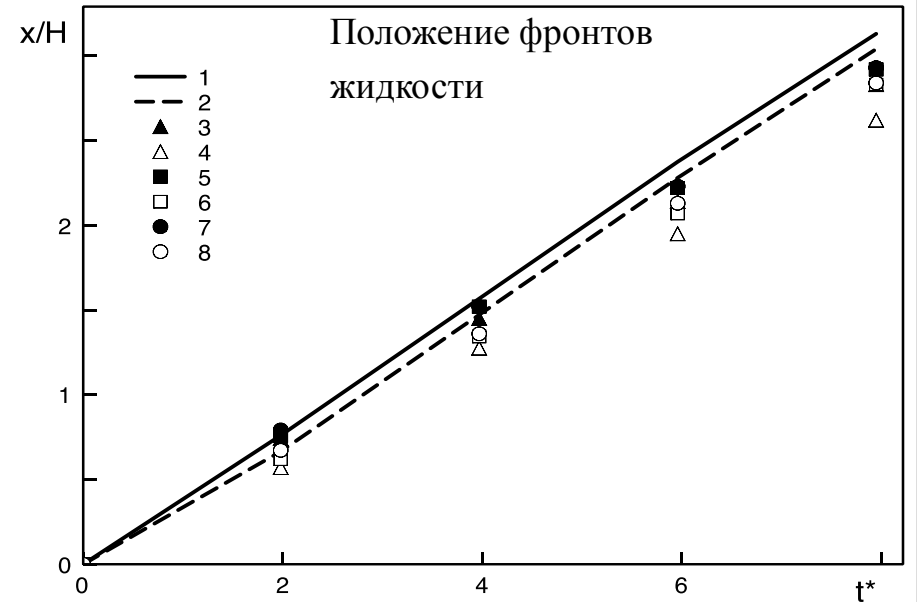
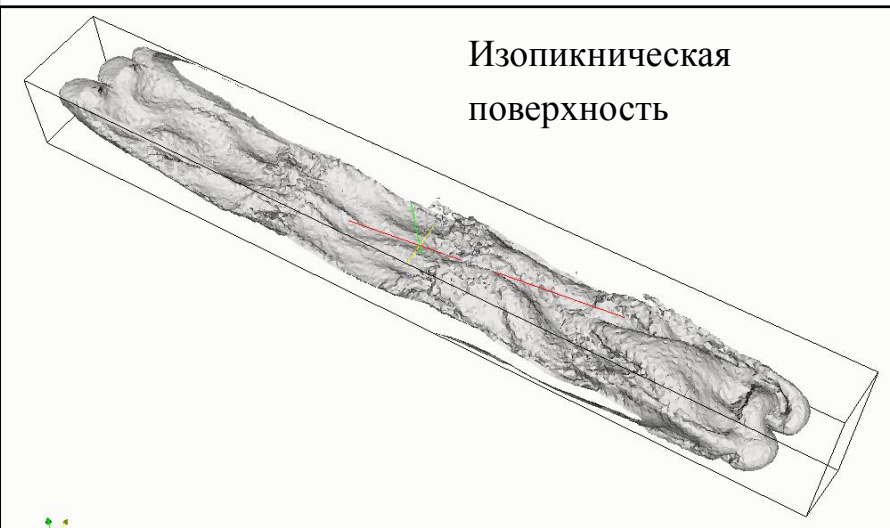
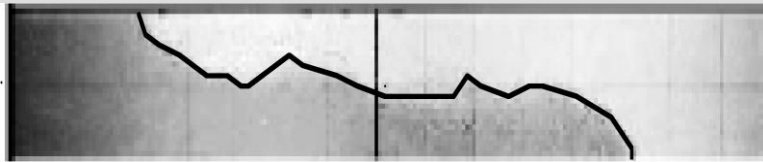


# Моделирование неустойчивости Кельвина- Гельмгольца



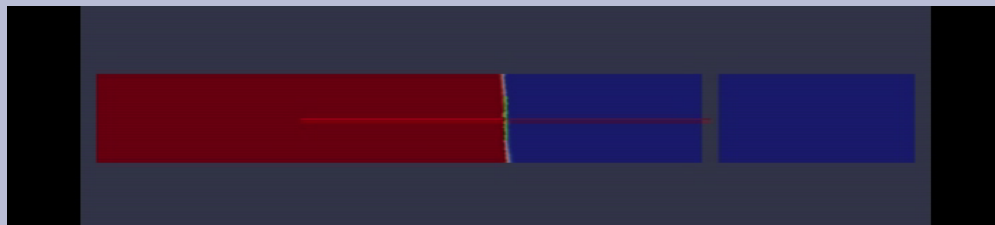
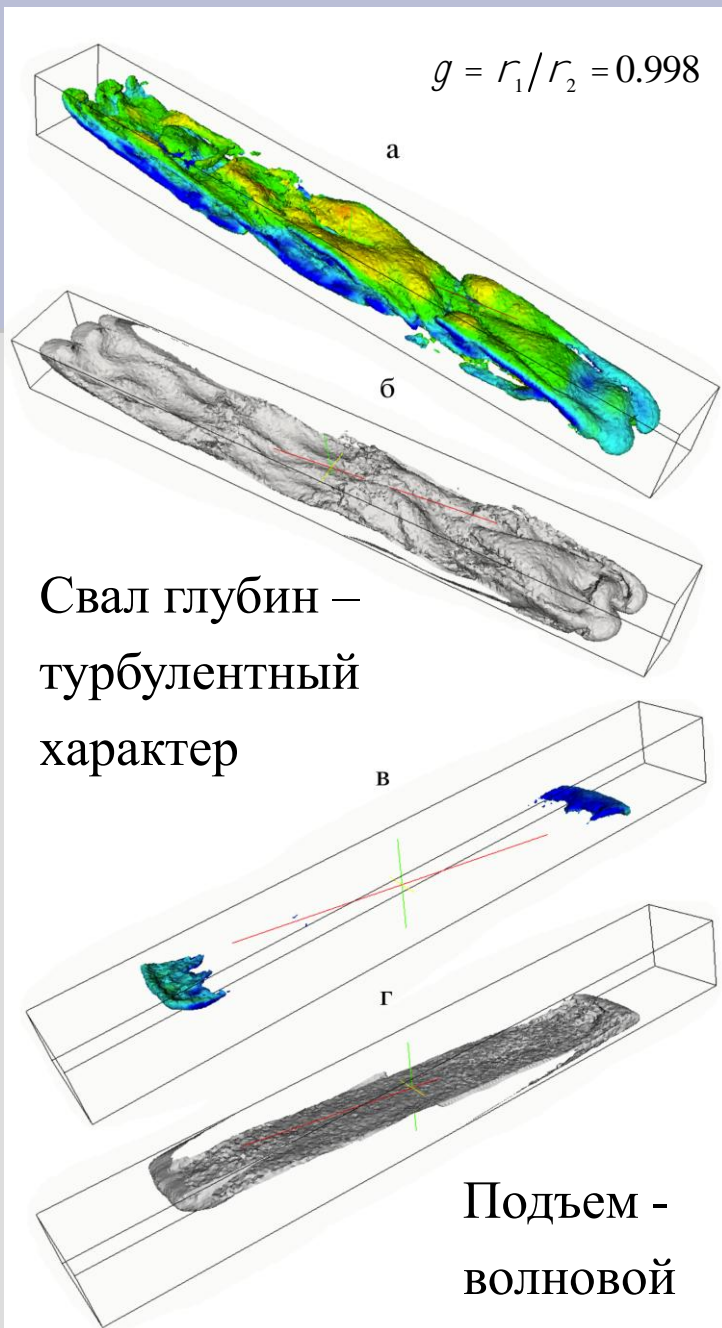
Гравитационное течение в канале

ГУ: условия прилипания, 2.5 млн. расч.  
ячеек

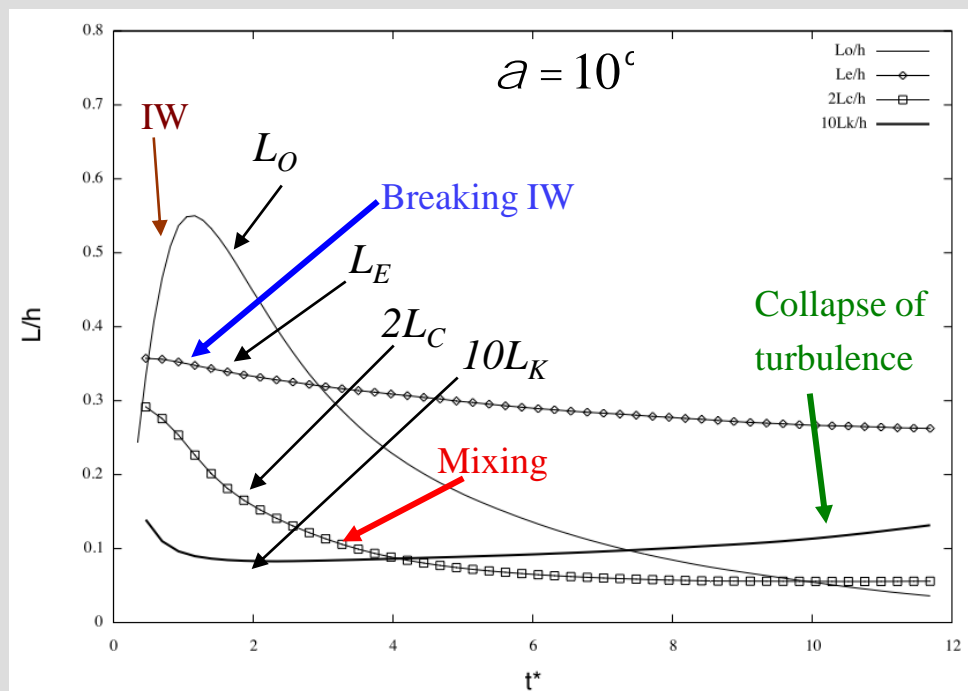




# Гравитационные течения на шельфе

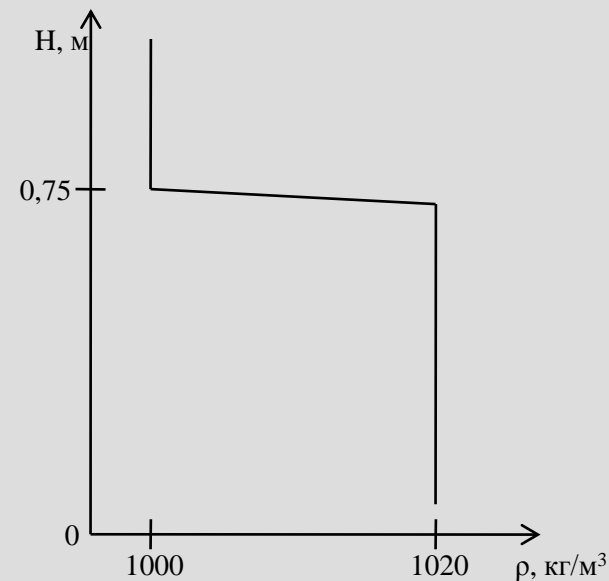
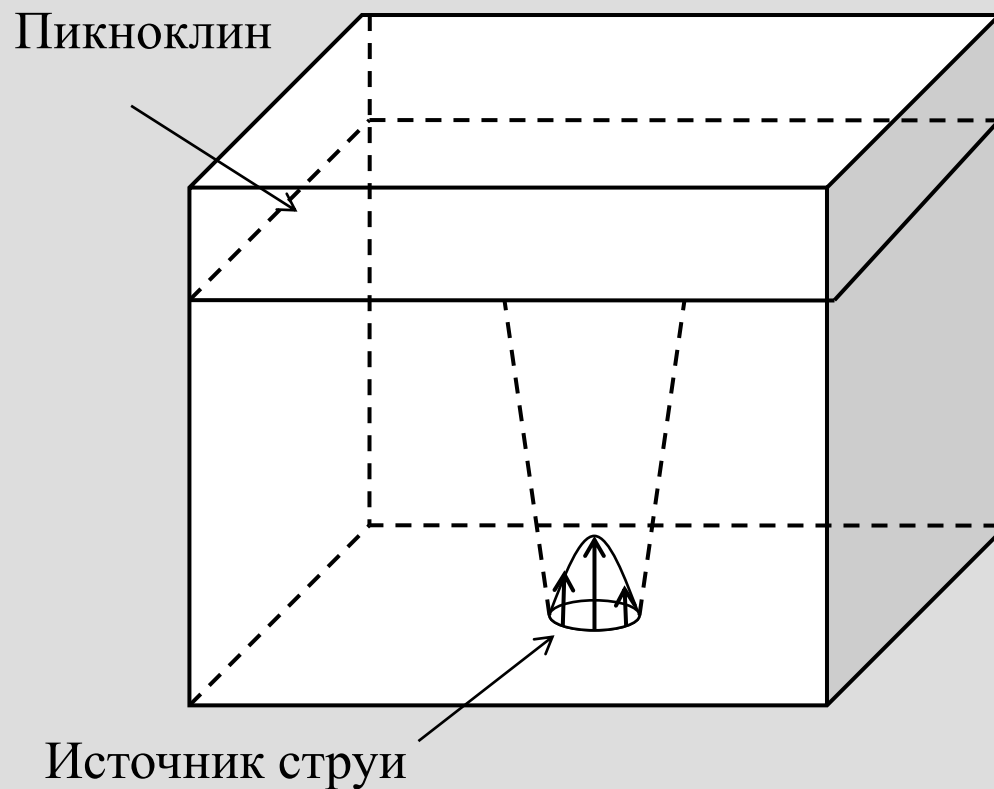


## Интегральные масштабы



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

# Взаимодействие затопленной струи с пикноклином



Профиль плотности

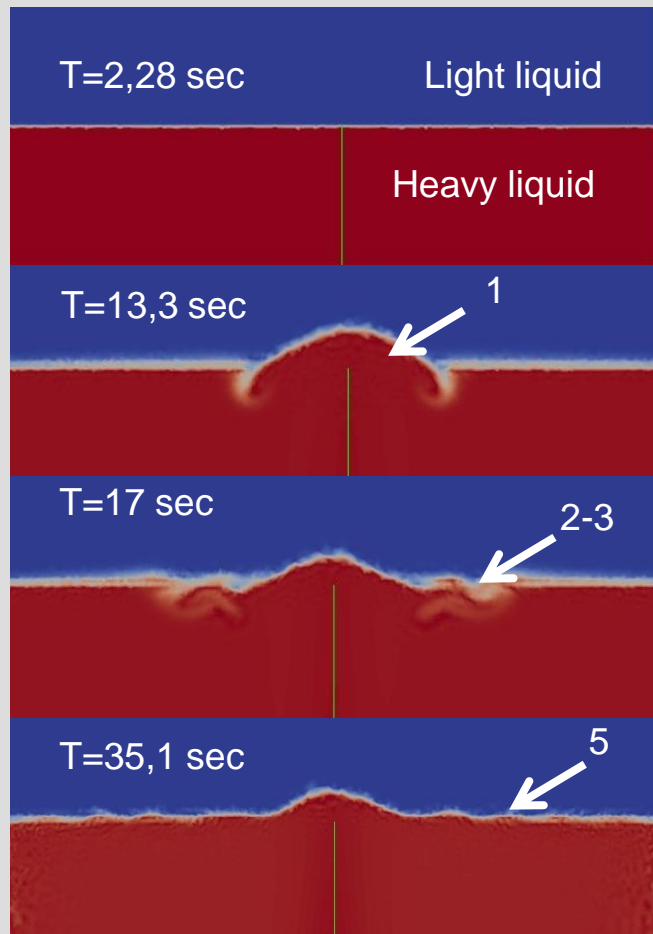
Число Рейнольдса  
Число Фруда

2548  
0,64

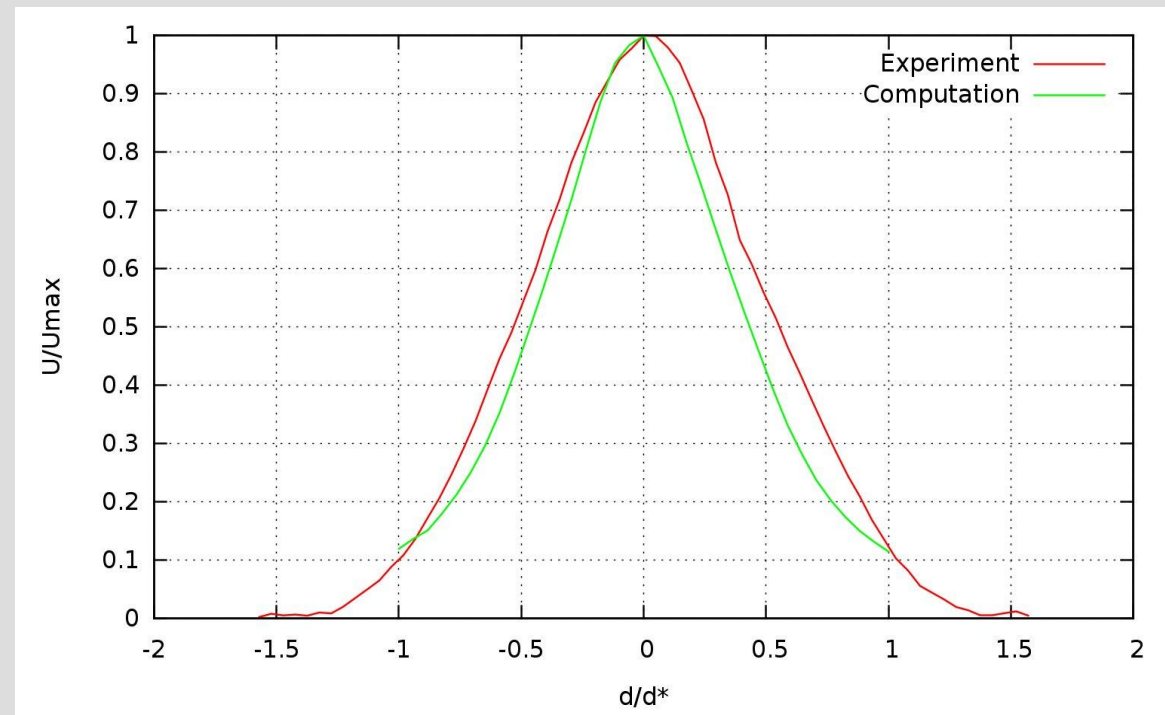
8 млн. расч. ячеек

# Взаимодействие затопленной струи с пикноклином

FlowFES, LES, MF, 3D

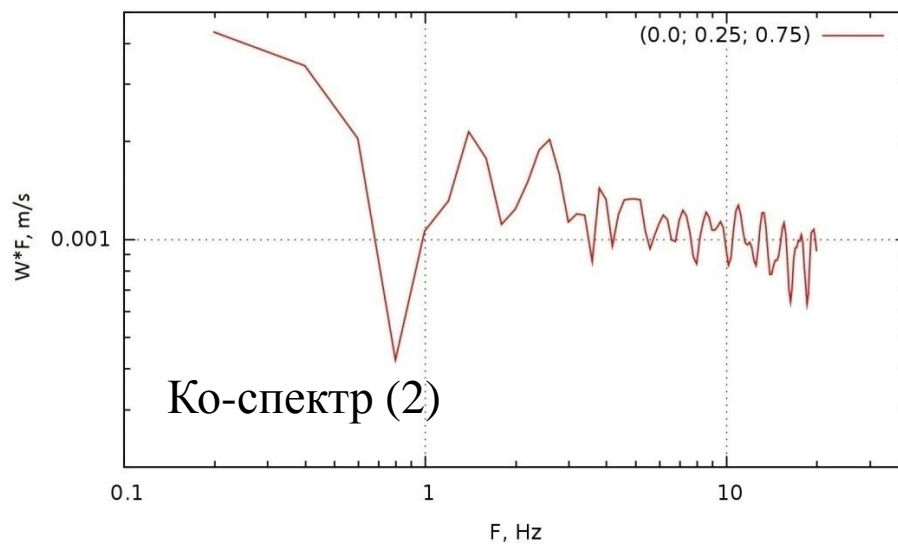
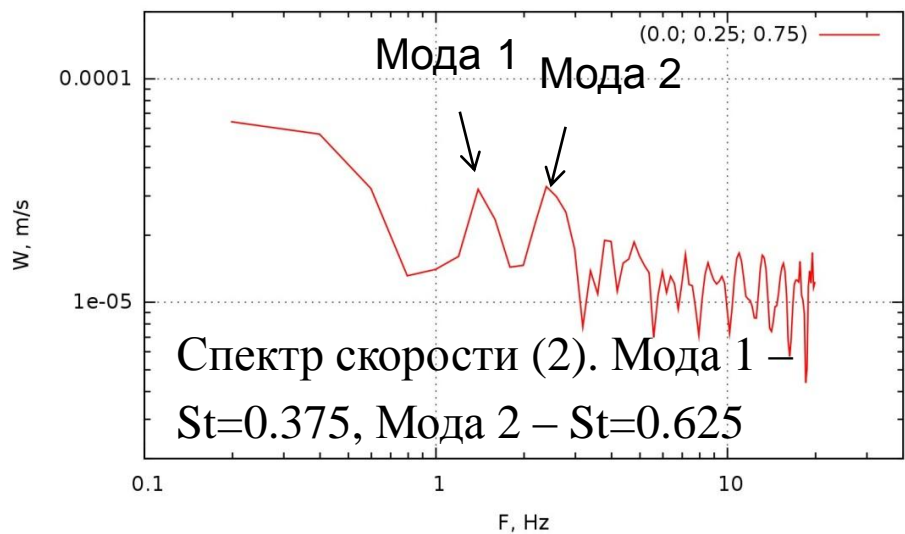
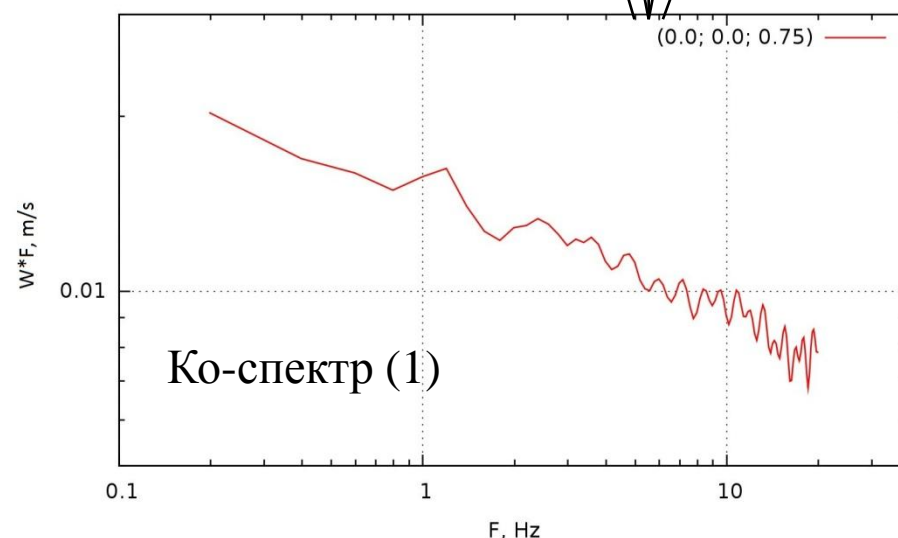
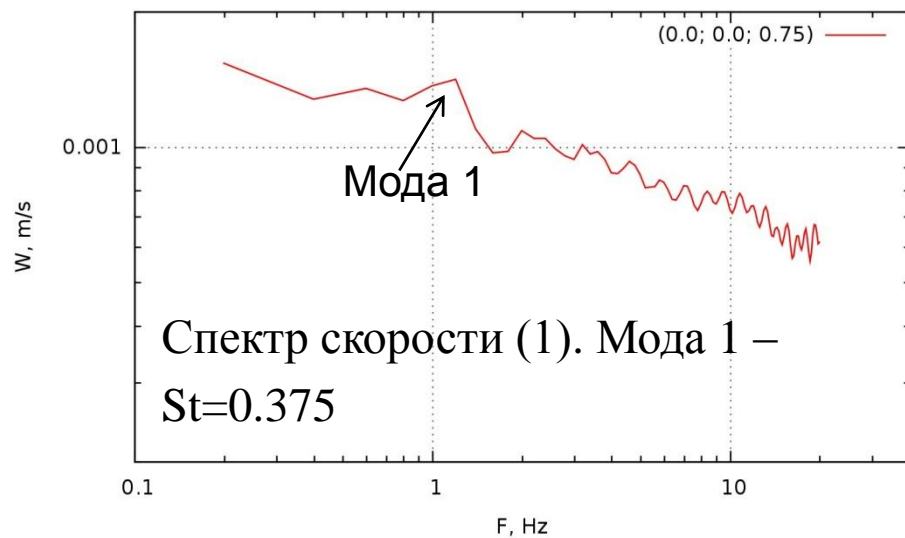
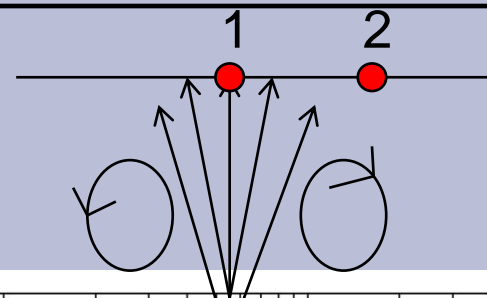


Безразмерное поле плотности

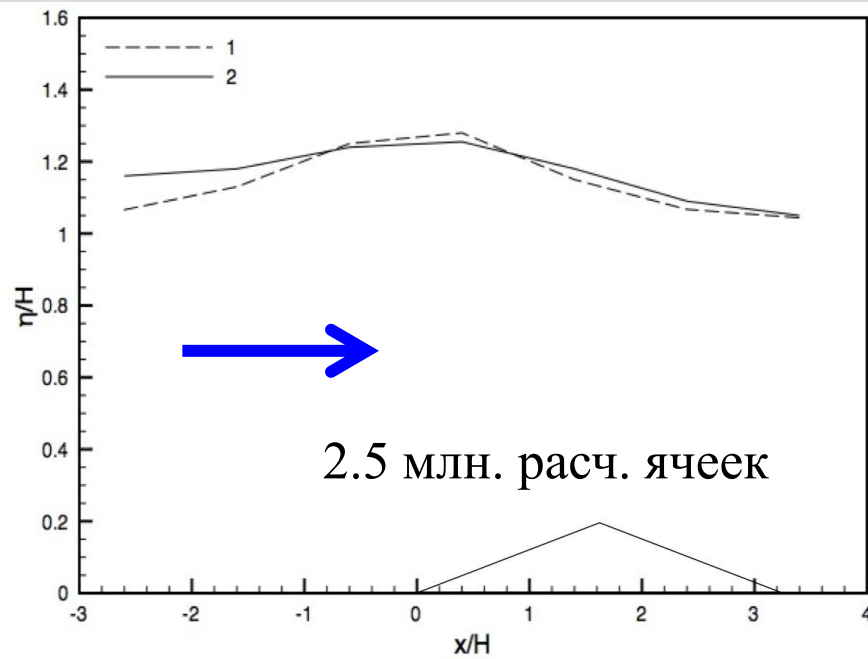


Осредненный по времени профиль скорости

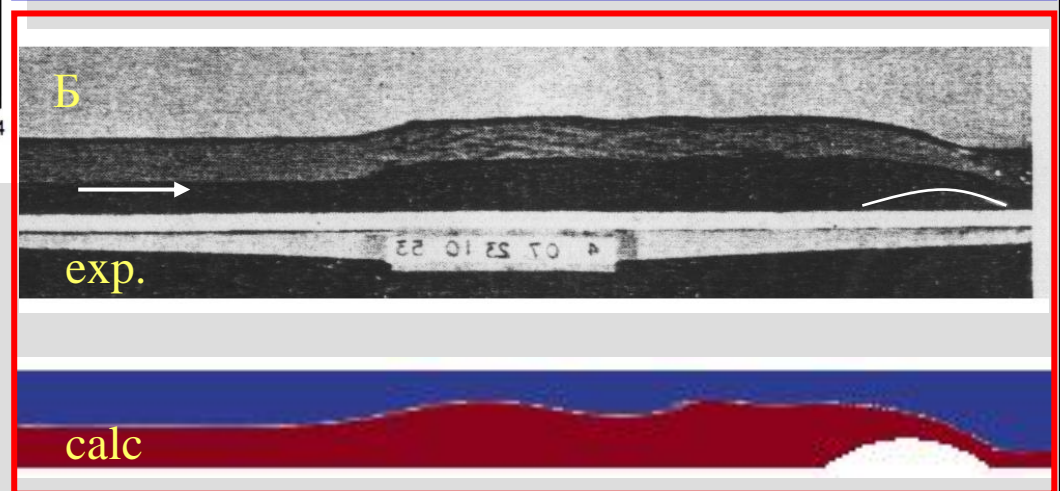
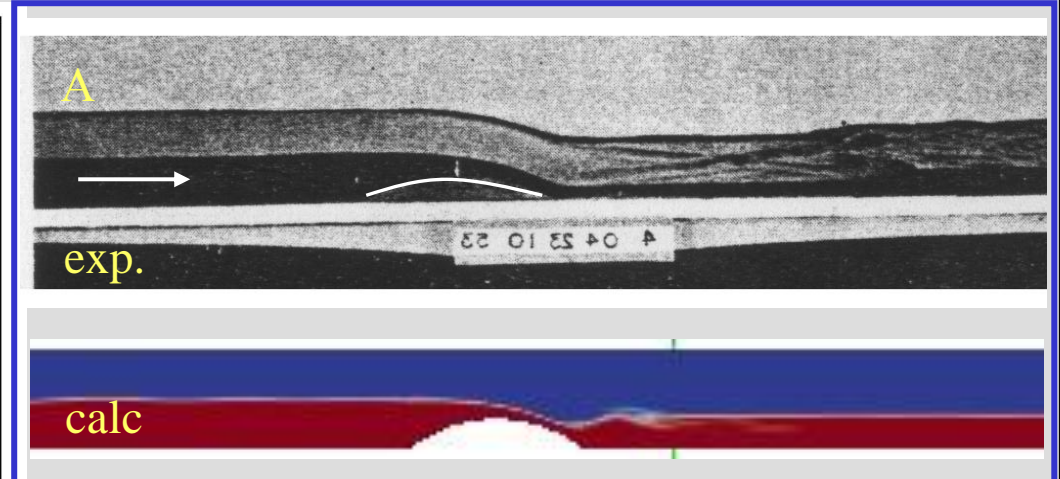
# Взаимодействие затопленной струи с пикноклином



# Моделирование гидравлических скачков



2.5 млн. расч. ячеек

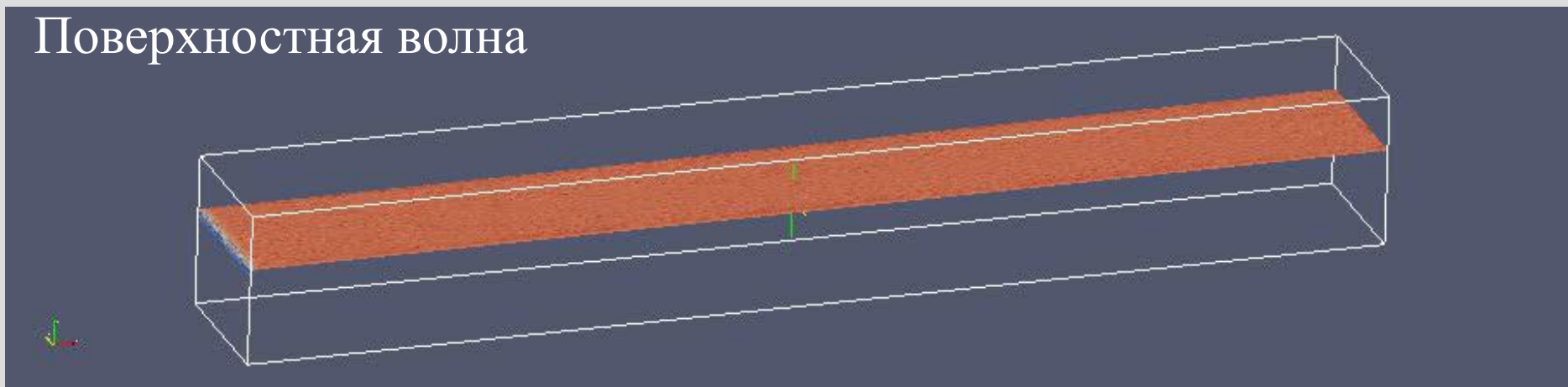


А – докритический режим;  
Б – сверхкритический режим.

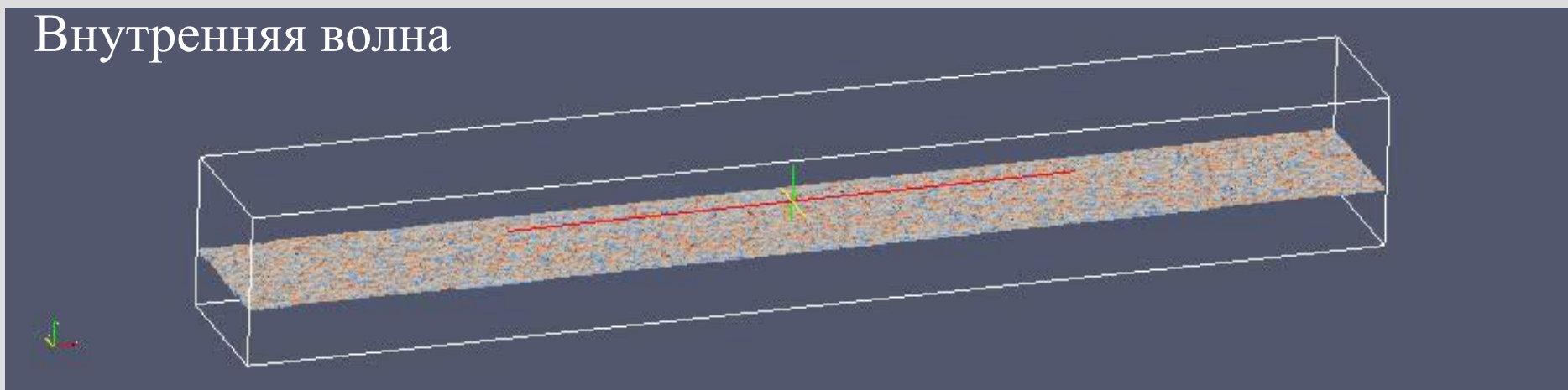
# Взаимодействие поверхностных и

4 млн. расч. ячеек **внутренних волн**

Поверхностная волна



Внутренняя волна

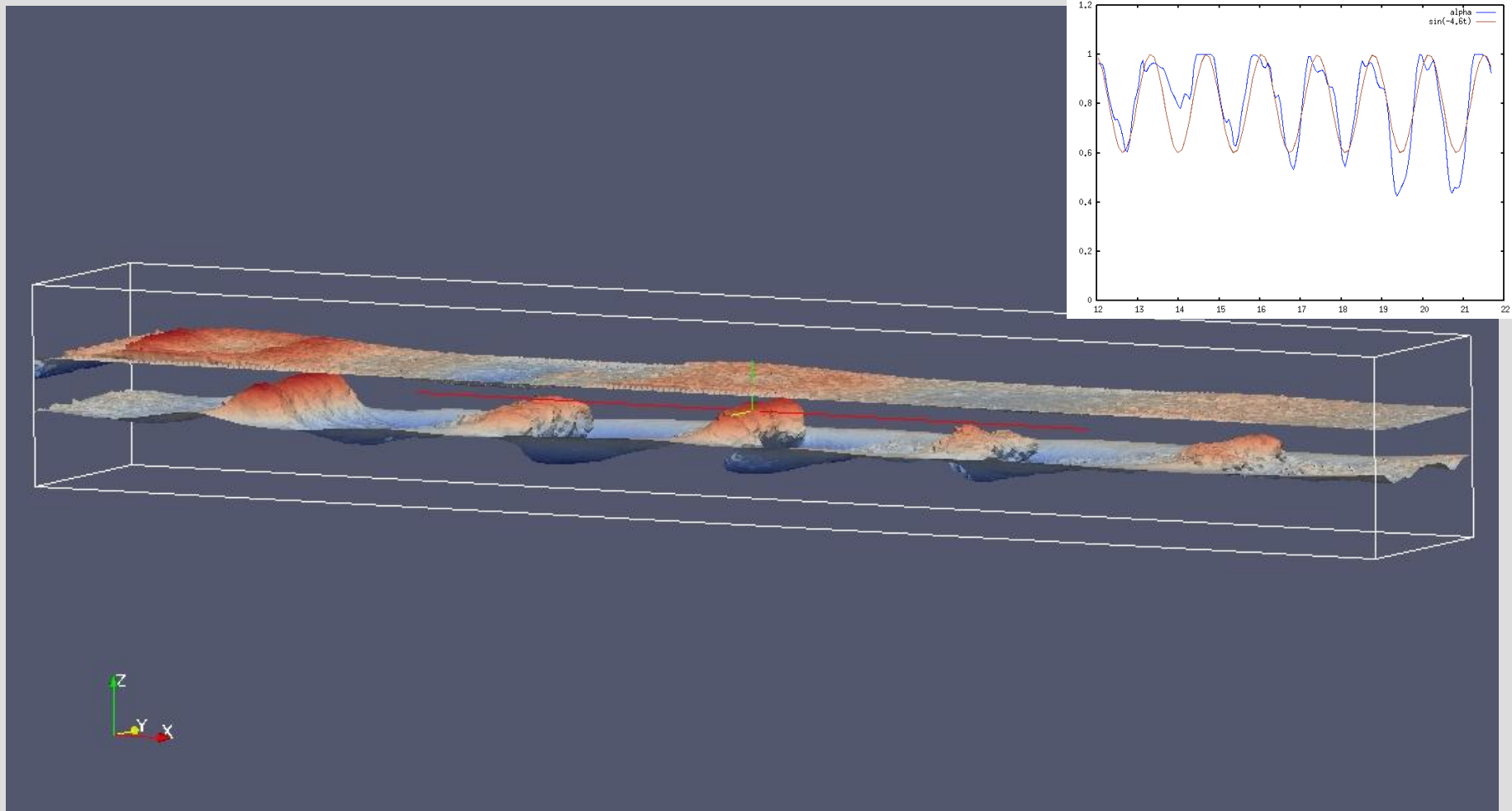




# Взаимодействие поверхностных и

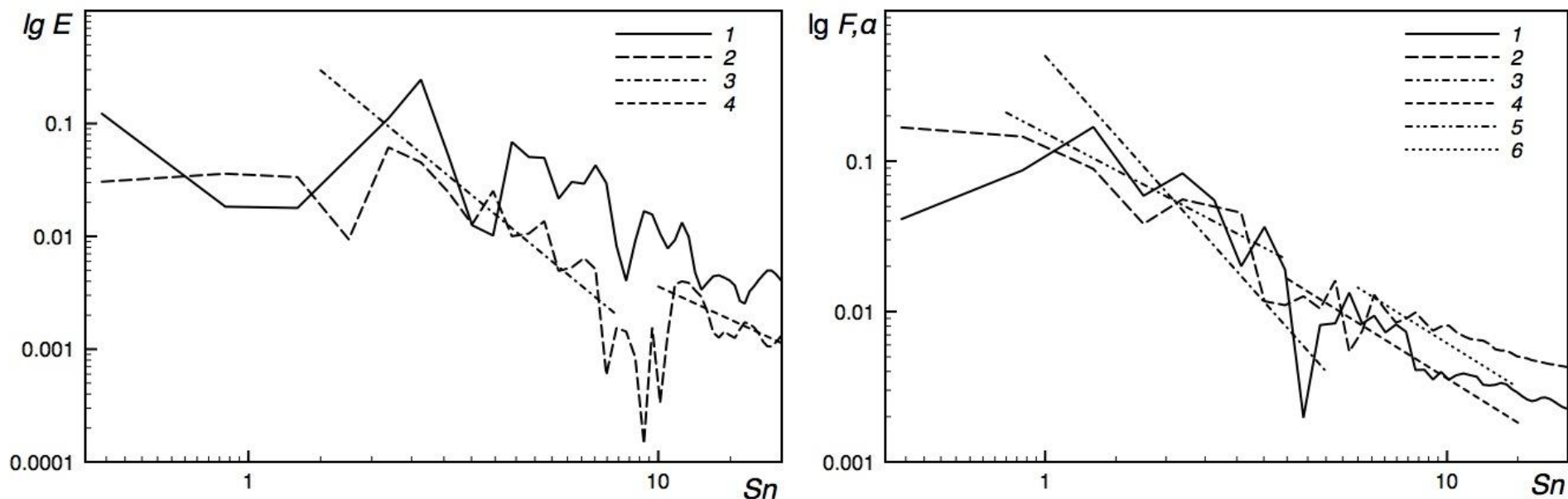
4 млн. расч. ячеек

# внутренних волн





# Взаимодействие поверхностных и внутренних волн

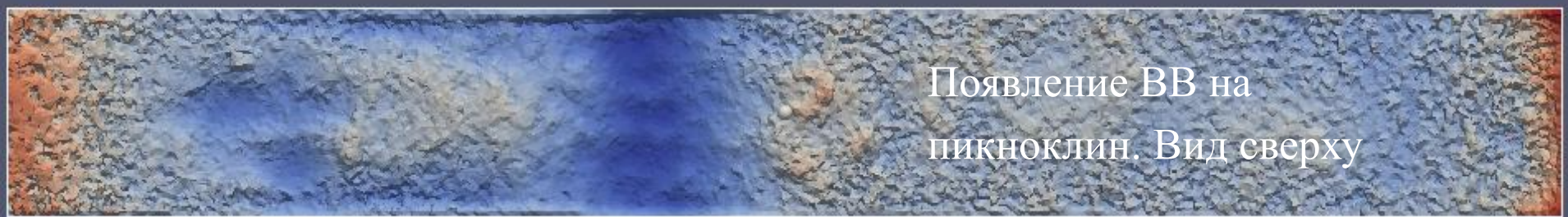
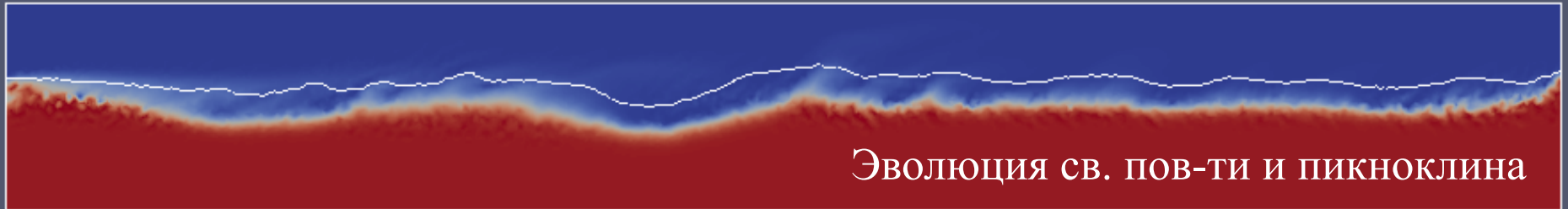


Частотные спектры вертикальной скорости (слева) и безразмерной плотности, объемной фракции жидкости (справа) в точках на уровне СП и пикноклина: 1 – спектр поверхностного волнения, 2 – спектр внутреннего волнения, 3 -  $\sim Sn^{-3}$ , 4 -  $\sim Sn^{-5/3}$ , 5 -  $\sim Sn^{-7/5}$ , 6 -  $\sim Sn^{-5/3}$ . Моды ПВ:  $Sn=2.6, 4.4, 7$ ; Моды ВВ: 2.2, 4, 5.3, 6.6.

# Ветро-волновое взаимодействие

4 млн. расч. ячеек

Скорость ветра 5 м/с



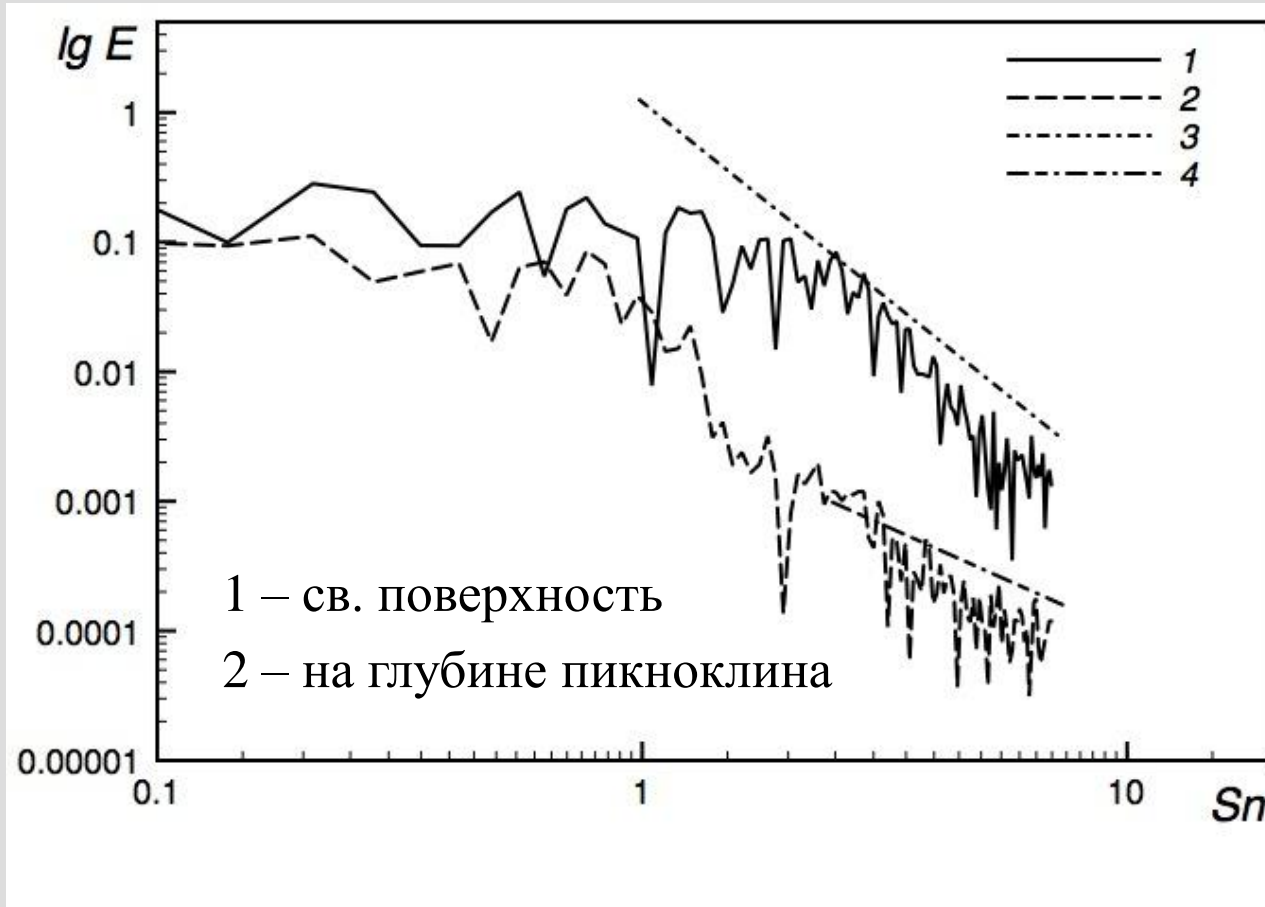
# Ветро-волновое взаимодействие



Формирование вклинивающегося буруна (а) и генерация подсеточной кинетической энергии (б) при увеличении скорости ветра до 10 м/с

# Ветро-волновое взаимодействие

Скорость ветра 5 м/с



Частотный спектр  
вертикальной скорости

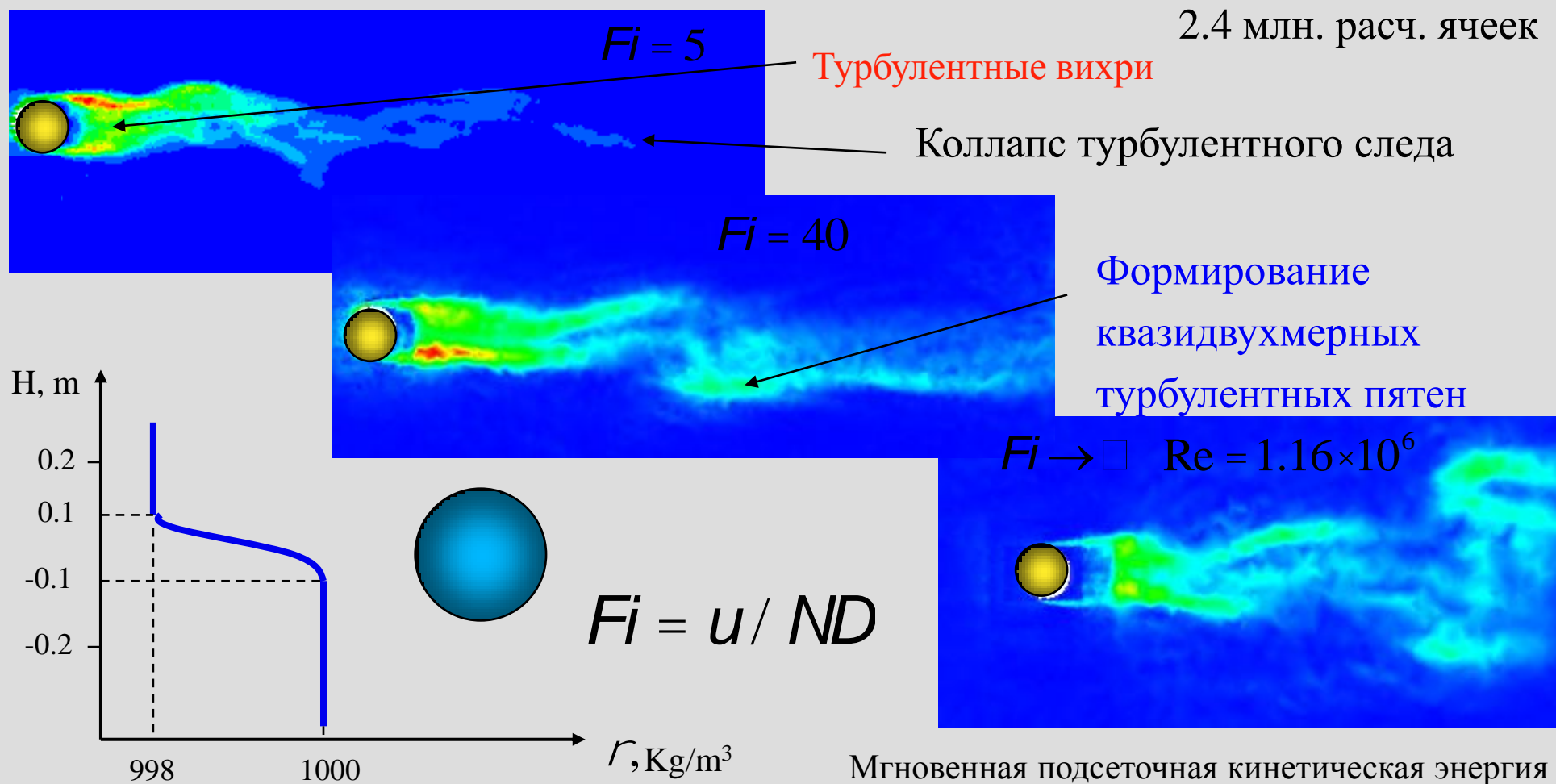
Волновые моды:  
 $S_n=0.77, 0.98, 1.27$

На уровне СП спектр  
носит волновой  
характер. На уровне  
пикноклина — волновой  
и турбулентный

# Моделирование взаимодействия тел с гидрофизическими полями океана

# Обтекание сферы потоком стратифицированной жидкости

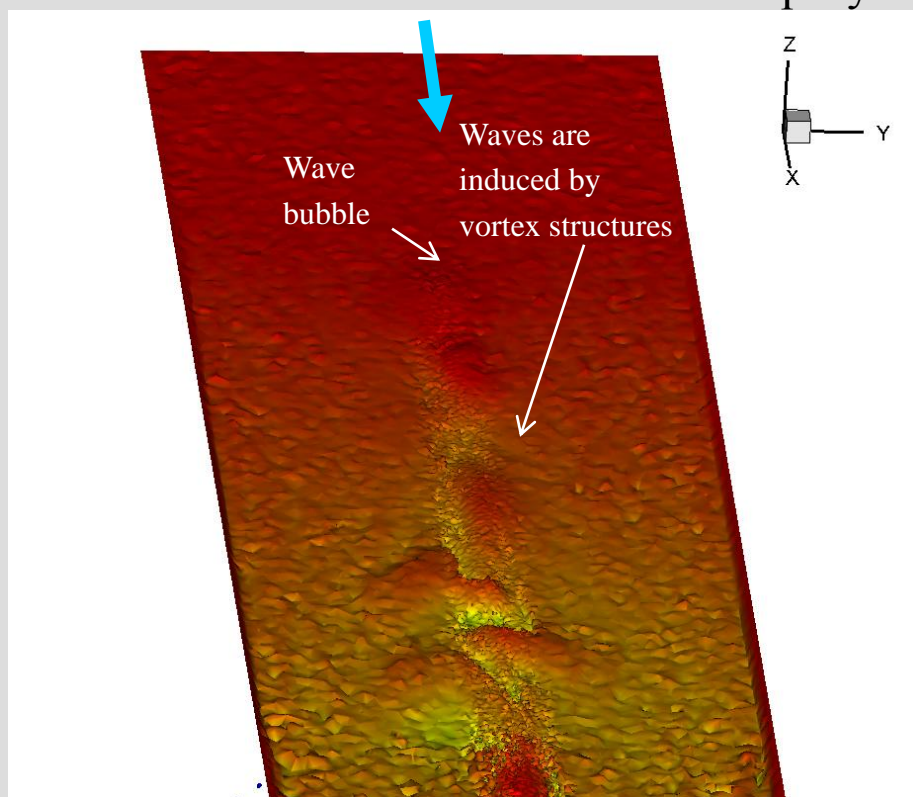
Турбулентный след



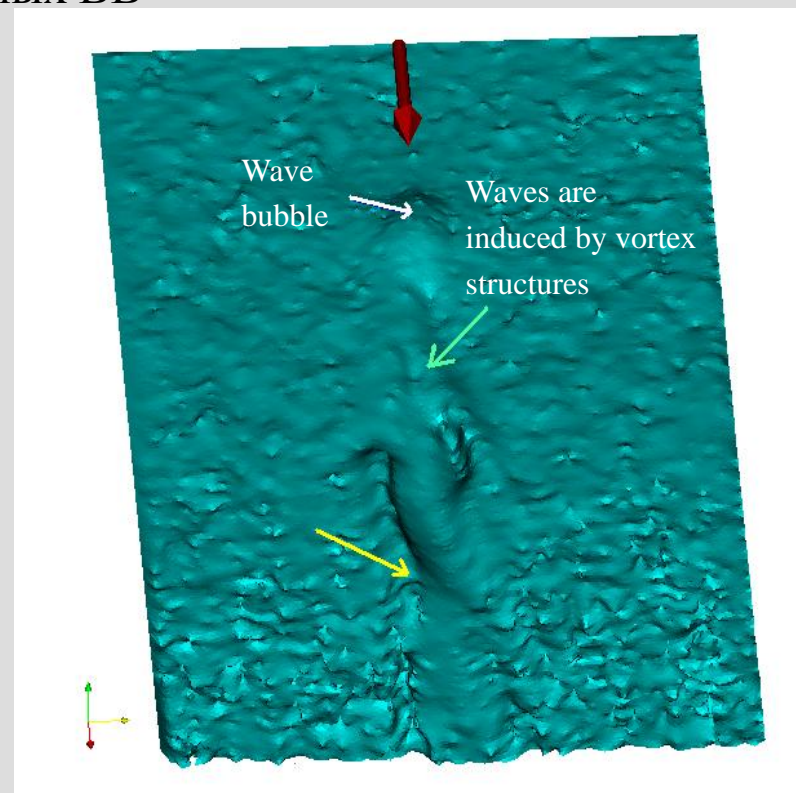


# Обтекание сферы потоком стратифицированной жидкости

Изопикнические поверхности. Формирование квазидвухмерных  
и нерегулярных ВВ



$Fi = 5$

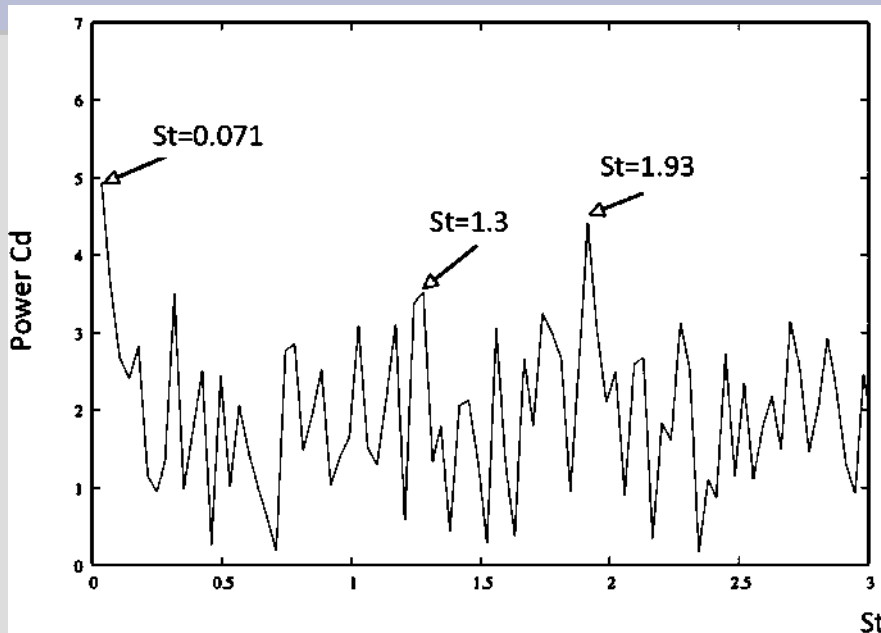


$Fi = 40$



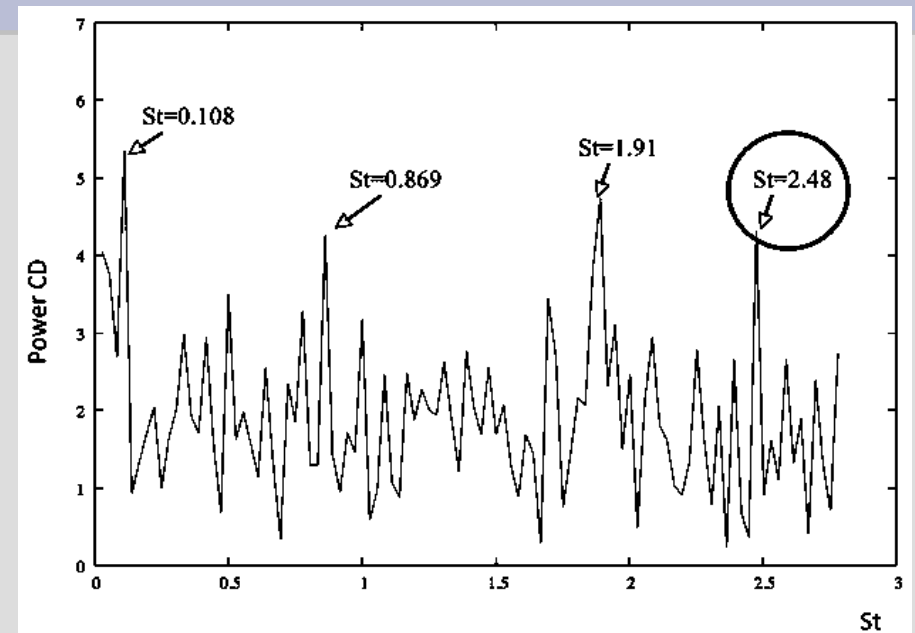
# Обтекание сферы потоком стратифицированной жидкости

Спектры коэффициента сопротивления



Спектр коэффициента сопротивления в однородном потоке.

Экспериментальные значения частотных мод: 1-я мода -  $St=0.05-0.2$ ; высокие 2-я -  $St=1.1-1.3$  и 3-я -  $St=1.8-2.0$



Спектр коэффициента сопротивления в стратифицированном потоке  $Fi=5$ .

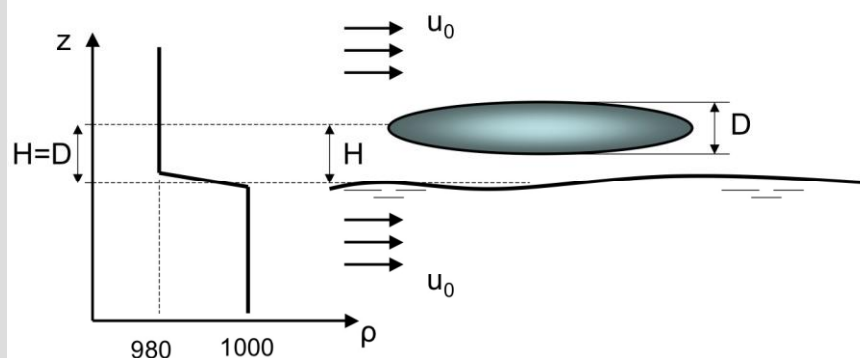
Дополнительная мода –  $St=2.48$

	$C_D^{calc}$	$C_D^{exp}$
$Fi=5, Re=14062$	0.34	0.377

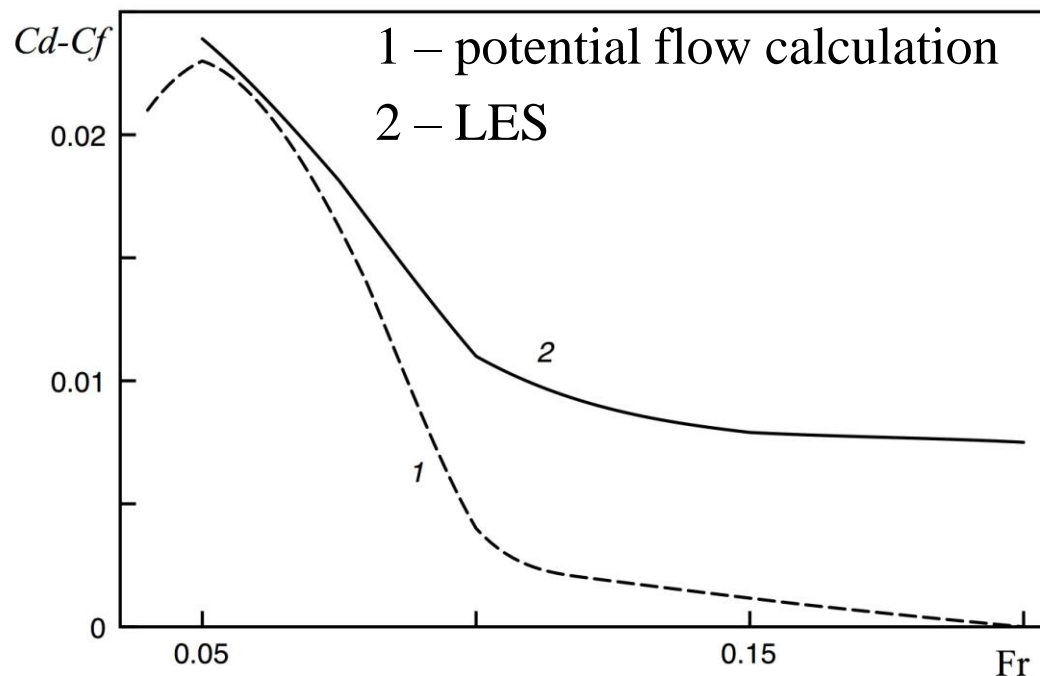
# Обтекание эллипсоида потоком стратифицированной жидкости

Коэффициент волнового сопротивления  $Cd-Cf$

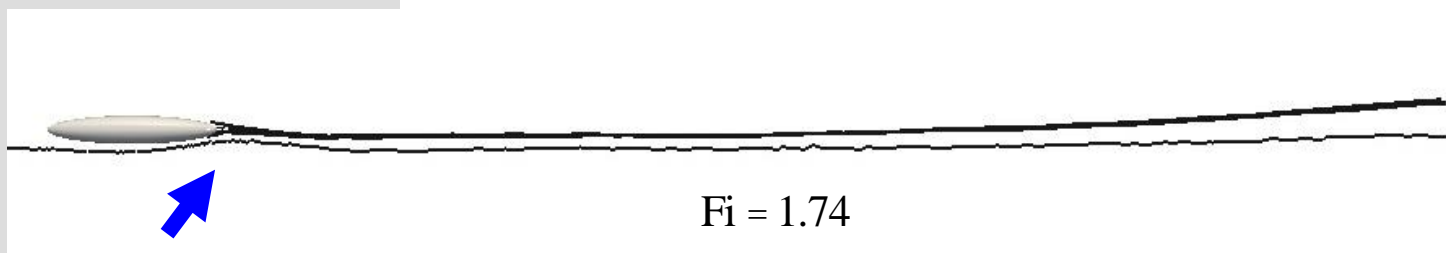
Эллипсоид вращения 6:1,  
LES  
3.6 млн. расч. ячеек



$$H=D, h=0.65D$$



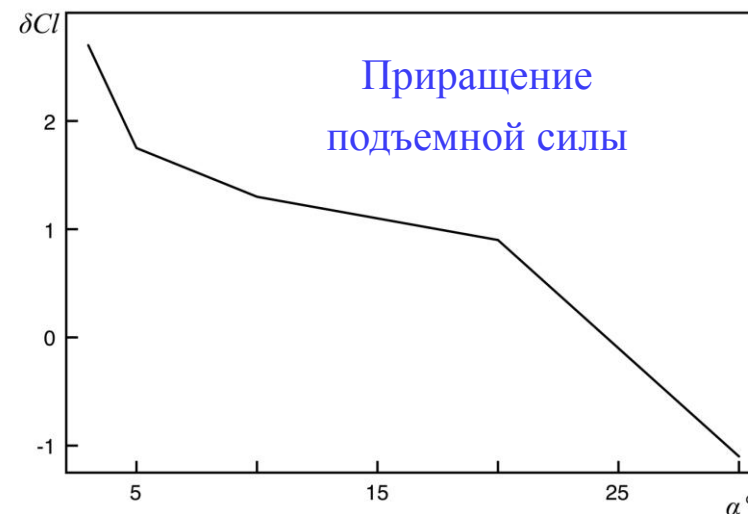
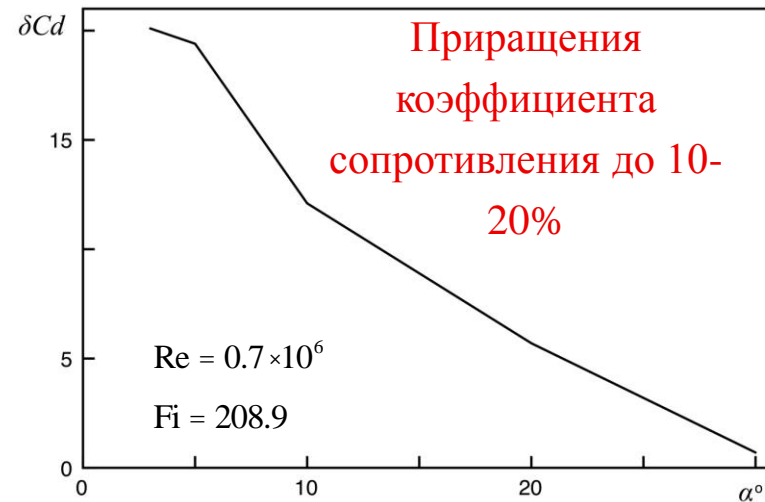
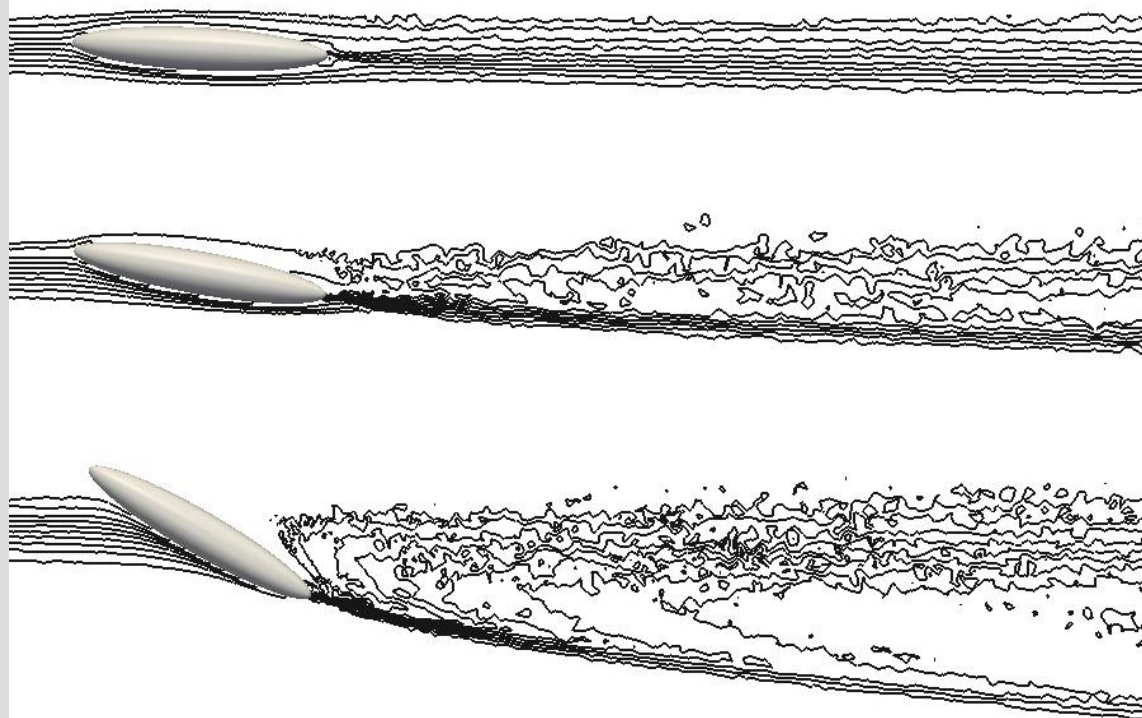
Тело над пикноклином



# Обтекание эллипсоида потоком стратифицированной жидкости

Тело внутри пикноклина

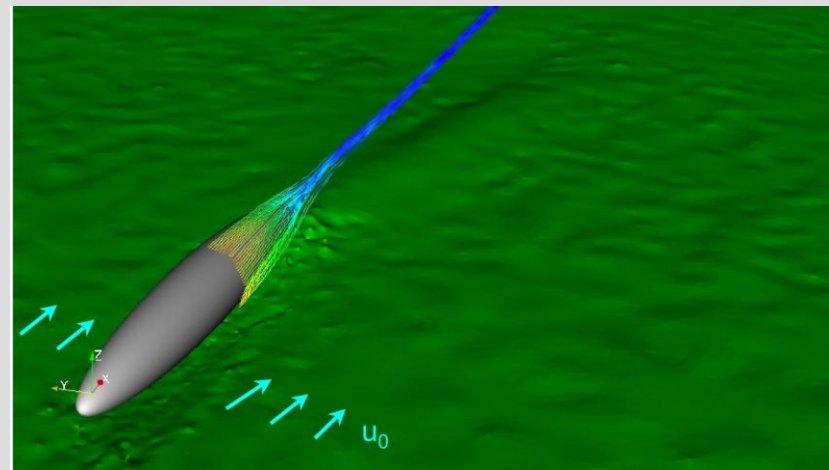
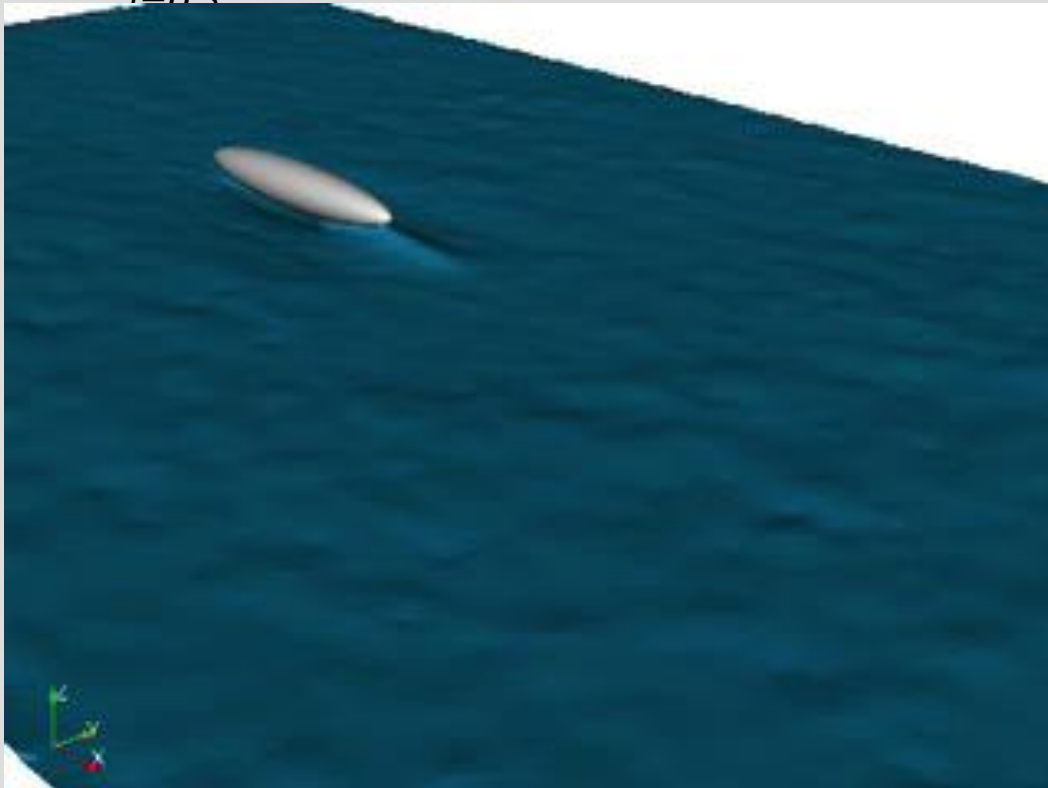
Изопикны



# Обтекание эллипсоида потоком стратифицированной жидкости

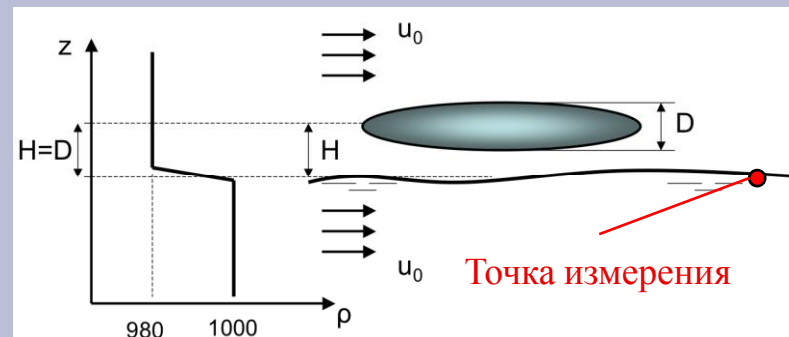
Эволюция изопикнической поверхности

$f=0.5$

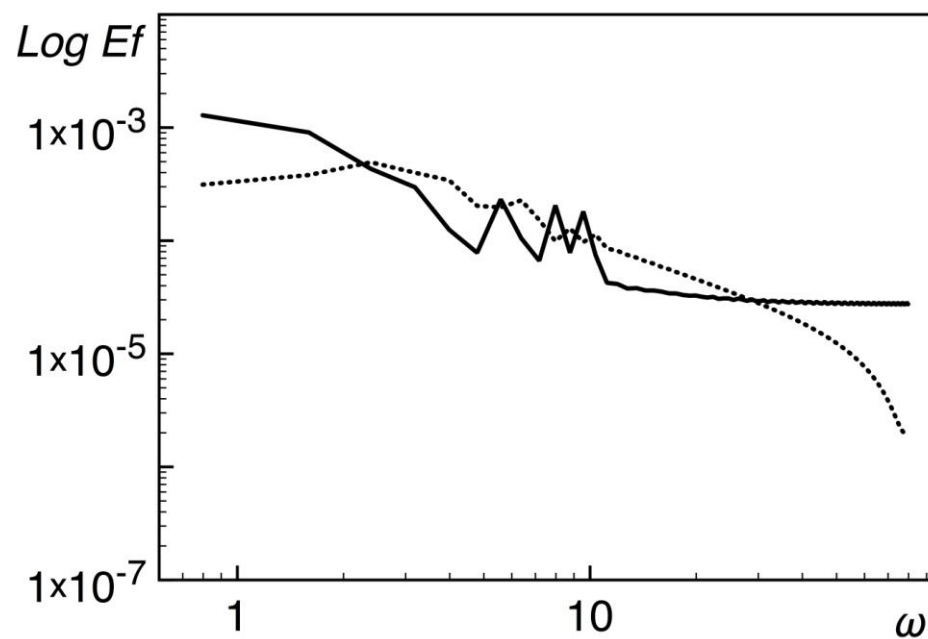
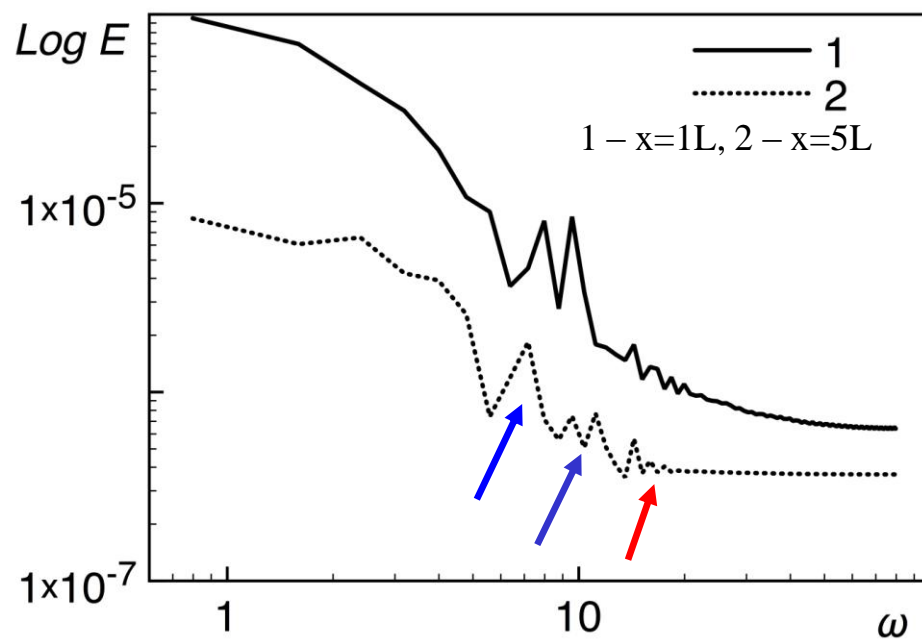


Генерация ВВ телом,  
расположенным над  
пикноклином.  $Fr=0.1$ ,  $H=D$ ,  $h=0.65$

# Обтекание эллипсоида потоком стратифицированной жидкости



Спектр вертикальной скорости и ко-спектр вертикальной скорости и плотности в точке  $y=0, z=-0.05, Fi=6.96$



При  $Fi=2.58$  на удалении  $L$  от кормовой оконечности в спектре одна дополнительная мода 18, при  $Fi=6.96$  на том же удалении две гармоники: 5 и 27; на удалении - три: 11, 15 и 24. При больших числах Фруда формируются две системы волн: длинные стоячие и случайные волны.

# Движение крыла над пикноклином

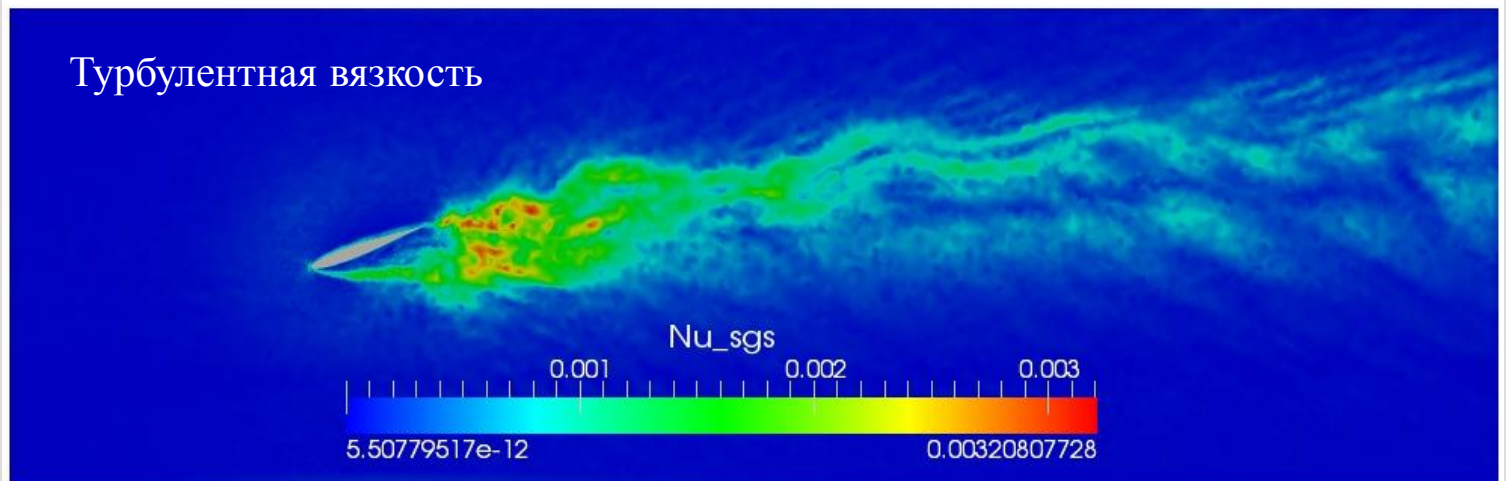
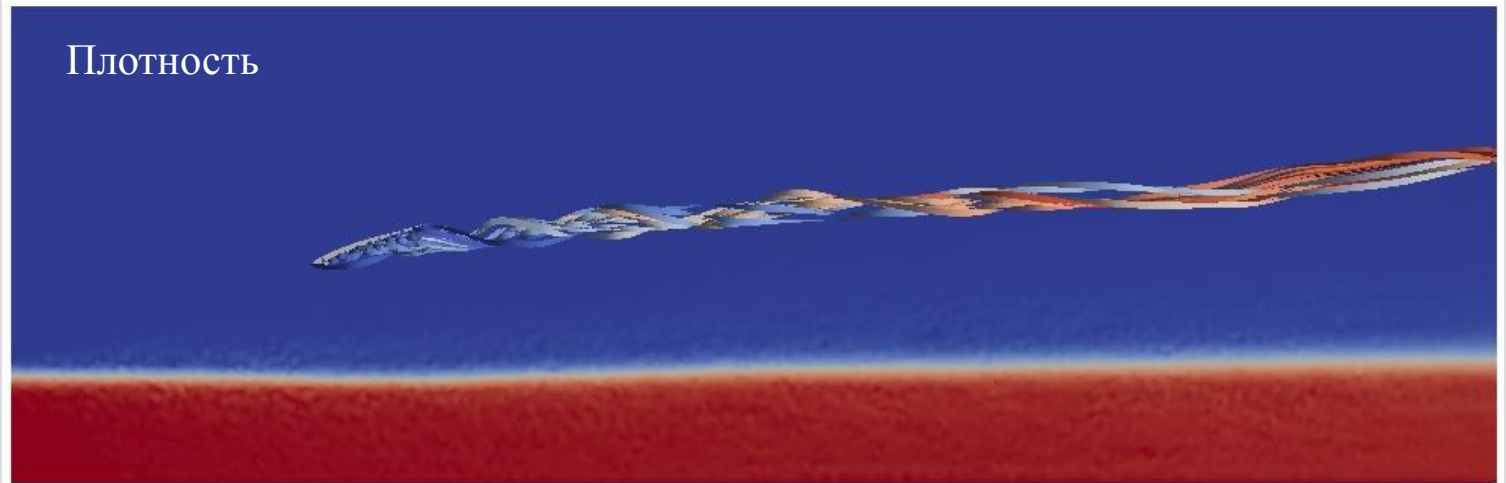
Стратификация: Данные Левитуса, Баренцево море, май 2005, 45E и 75N  
4 млн. расч. Ячеек, LES

$Re=6855000$ ,

$Fi=34.37$

Возвышение крыла  
над центром  
пикноклина  $1.1b$

Всплытие вихревых  
жгутов и расширение  
турбулентного следа.  
Незначительное  
искажение  
изопикнической  
поверхности.





# Движение крыла под пикноклином

Стратификация: Данные Левитуса, Баренцево море, май 2005, 45E и 75N

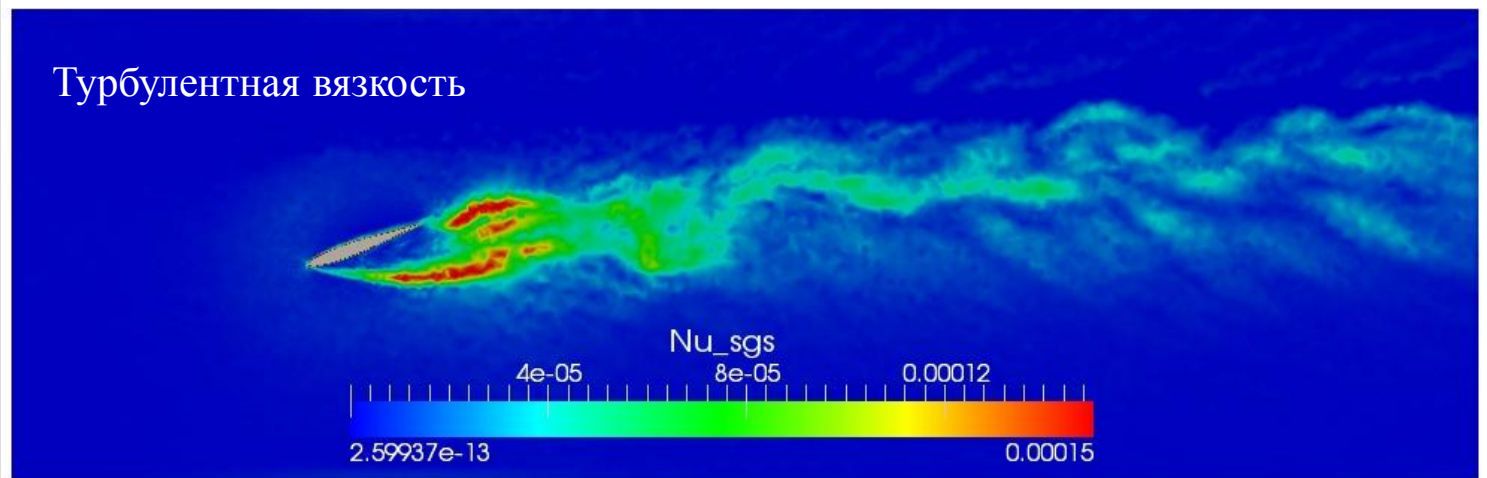
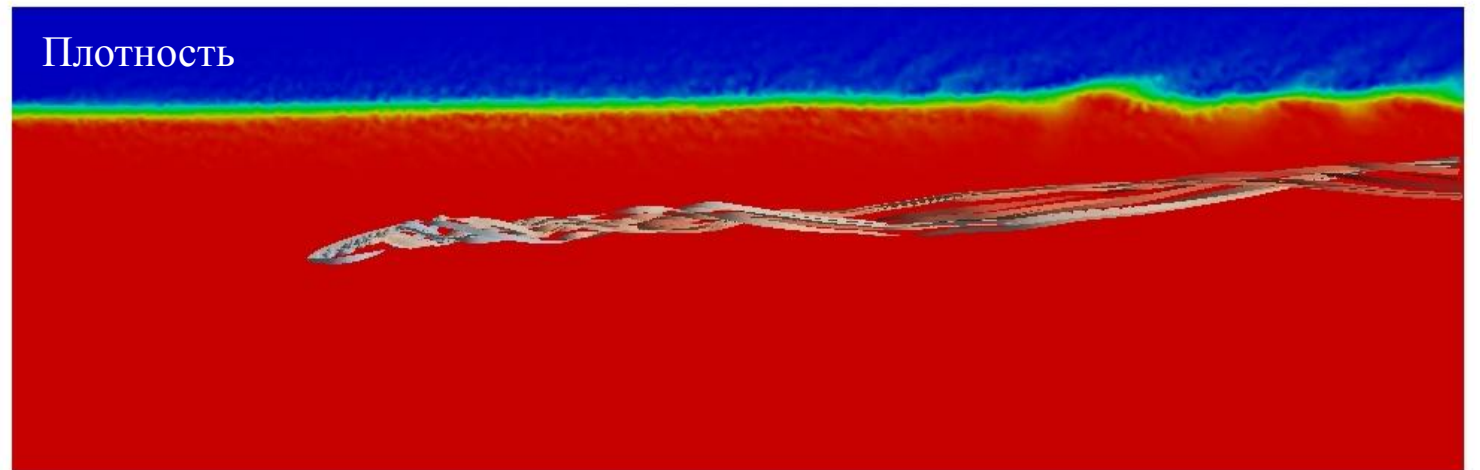
$Re=313000$ ,

$Fi=1.42$

Заглубление крыла по отношению к центру пикноклина  $1.1b$

Всплытие вихревых жгутов и расширение турбулентного следа до границы пикноклина.

Наблюдается формирование внутренних волн. Торцевые вихри уходят далеко вниз по течению.



# Течение за крылом

LES, MF, 3D,  
Крыло: BQM 34,  
удлинение 1.2,  
линейная  
стратификация

$Re=ub/\nu=313000$ ,  
 $Fi=u/Nb=1.42$

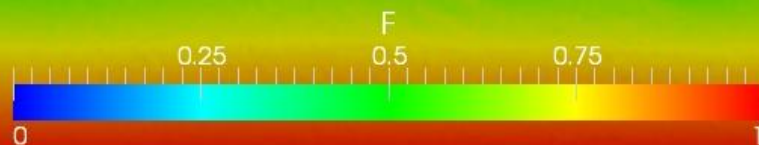
Торцевые вихри не  
всплывают. Коллапс  
турбулентного следа.

Internal waves

Top view

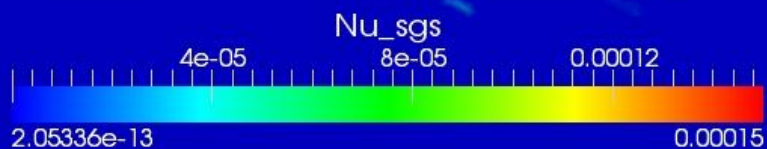
Density field

Vertical slice



Turbulent viscosity

Vertical slice



# Моделирование течений в корабельных системах и трубопроводах

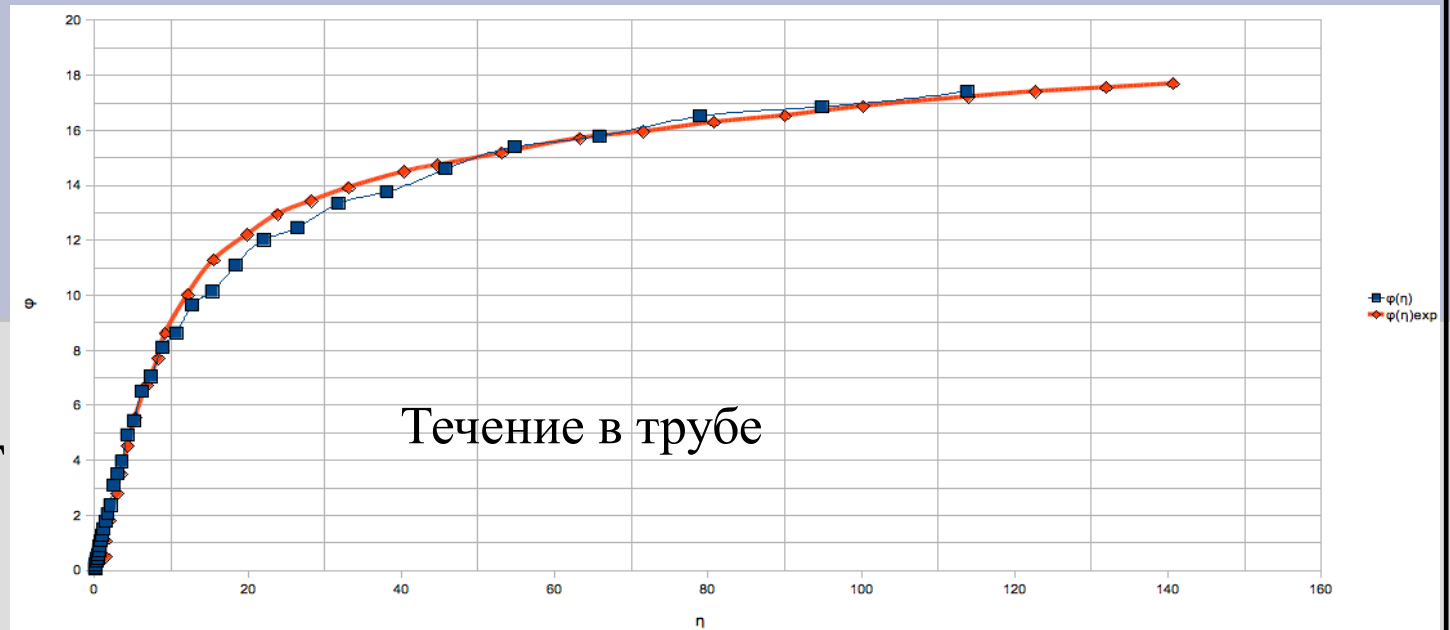
# Течение в судовых системах

$Re=4000$

OpenFOAM,  $k-\epsilon$ , SST

$\lambda=0.04$  (эмпир.)

$\lambda=0.045$  (расч.)



$Re=105000$

OpenFOAM,  $k-\epsilon$ , SST

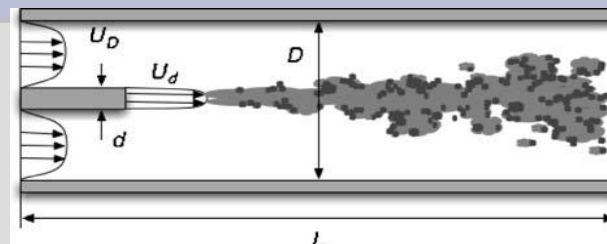
$\lambda=0.0176$  (эмпир.)

$\lambda=0.019$  (расч.)

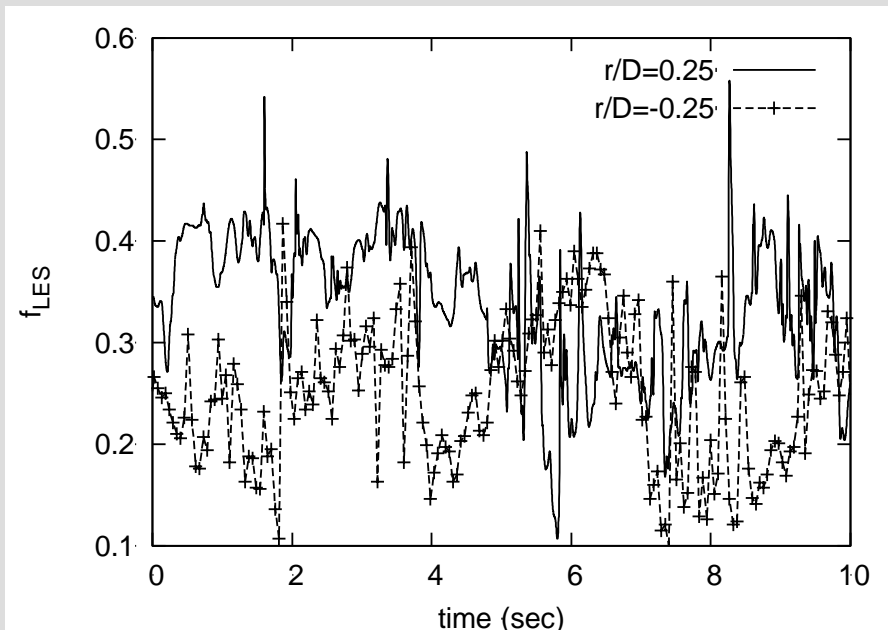


# Однородное струйное течение в канале смесителя

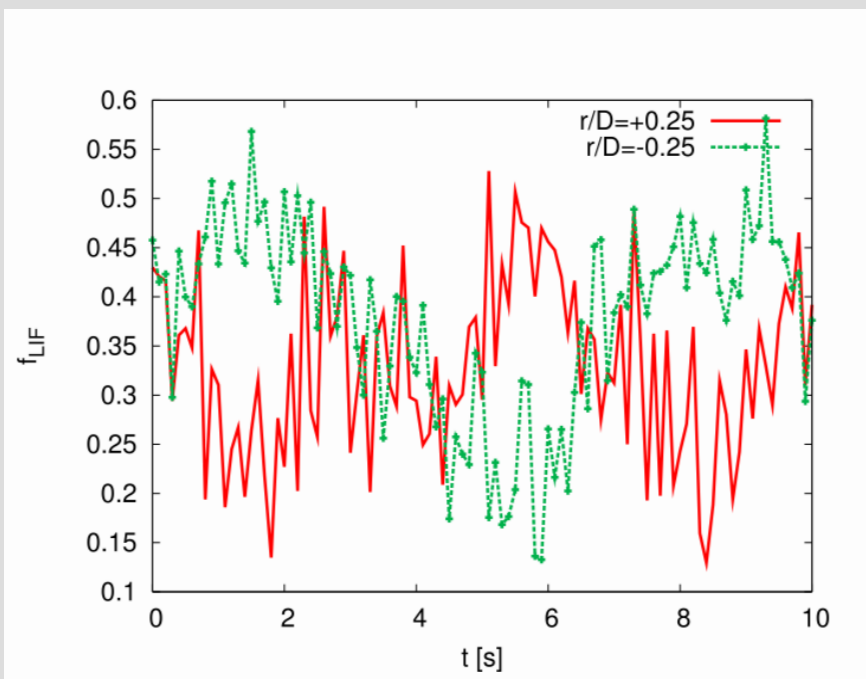
ГУ: профиль скорости + ГСЧ, ПФ, давление на выходе



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



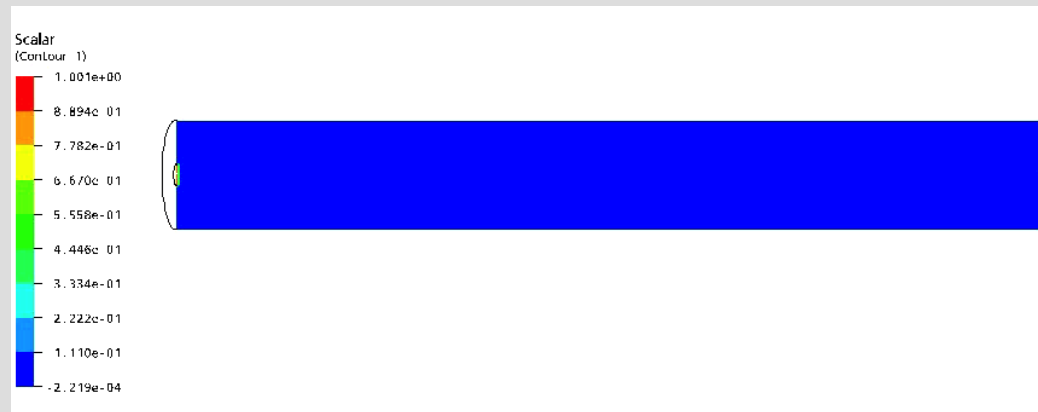
Расчет



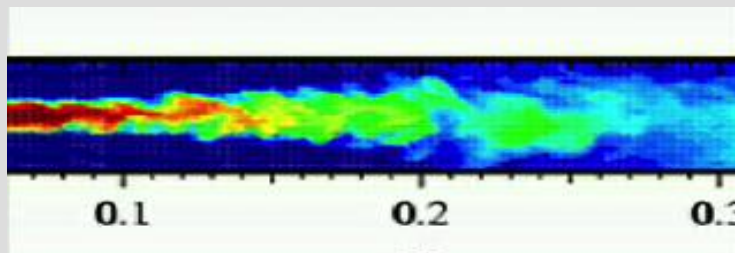
Эксперимент

# Однородное струйное течение в канале смесителя

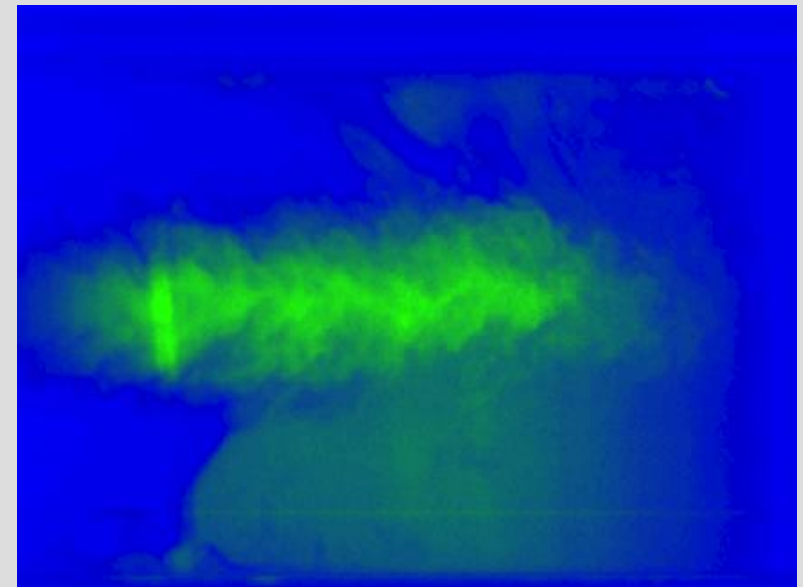
Нестационарный расчет. URANS, SST модель



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)

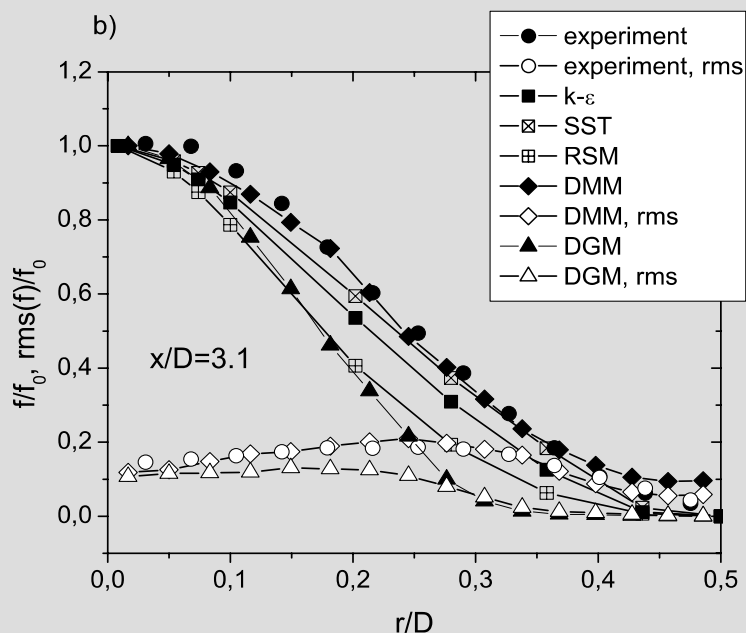
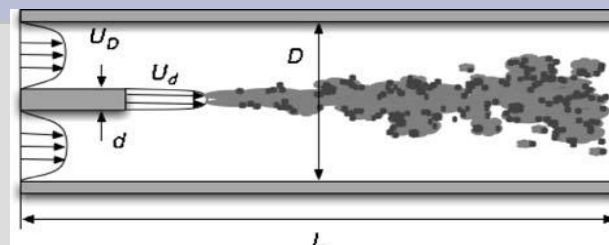


# Однородное струйное течение в канале смесителя

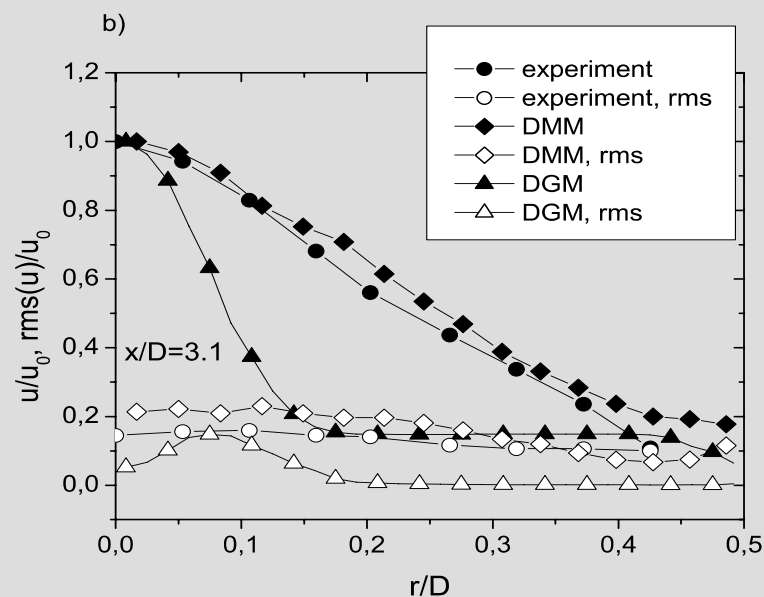
## Оценка моделей турбулентности

Профили осредненной величины и среднеквадратичной пульсации

$x/D = 3.1$        $Re_d = 10^4$



Коэффициент смеси

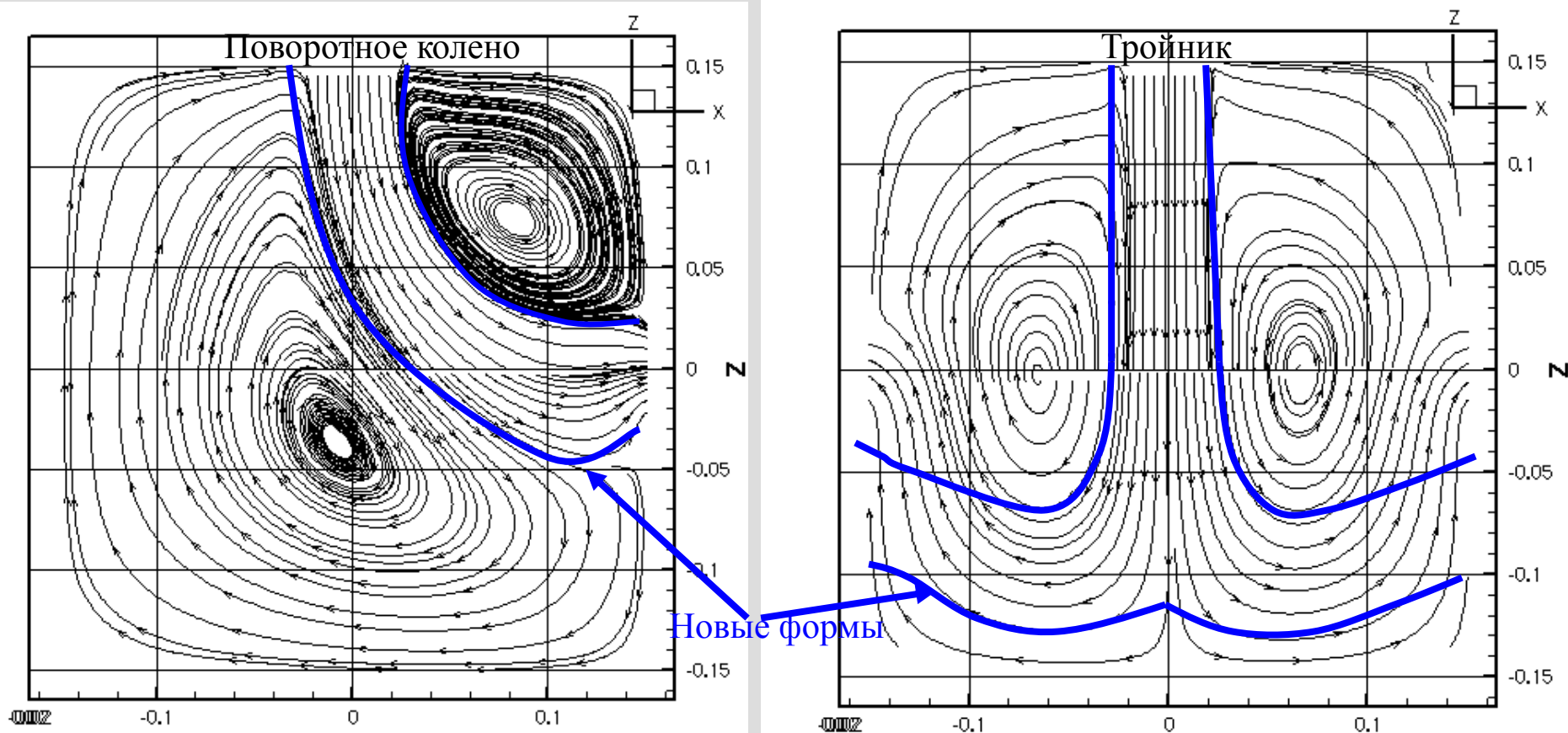


Аксиальная компонента скорости

# Оптимизация фасонных элементов судовых систем

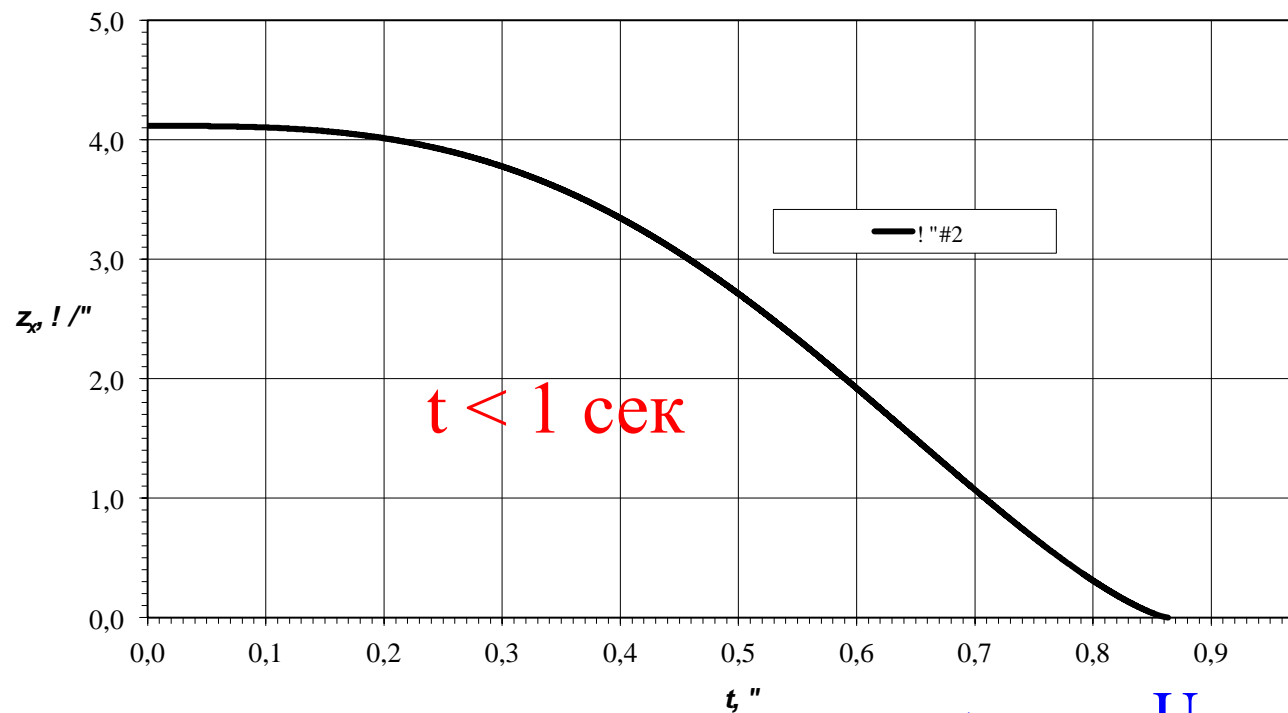
Поворотное колено и тройник

*к-ε модель*

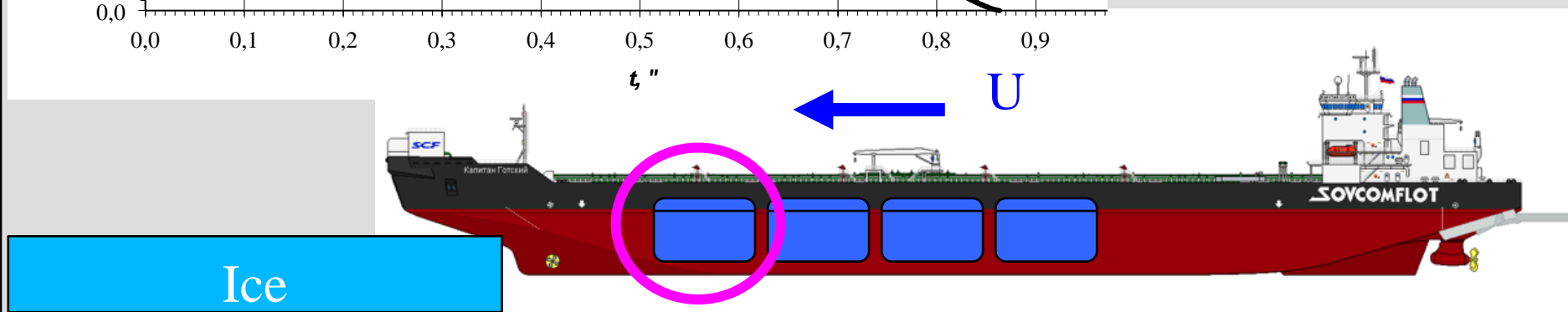


Создание новых форм фасонных элементов

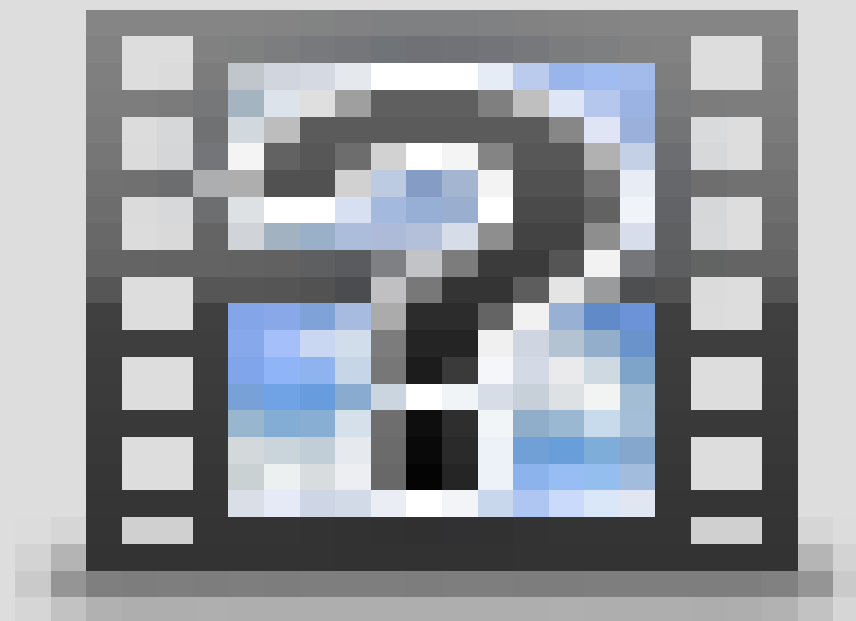
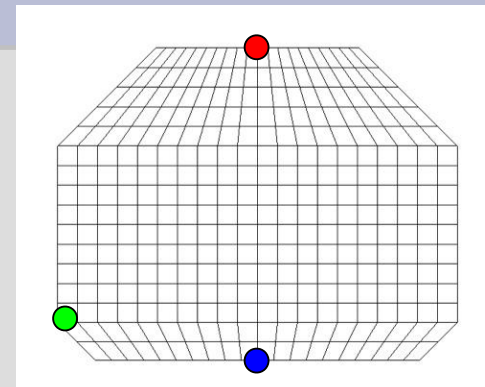
# Колебания жидкости в танке при соударении судна со льдом



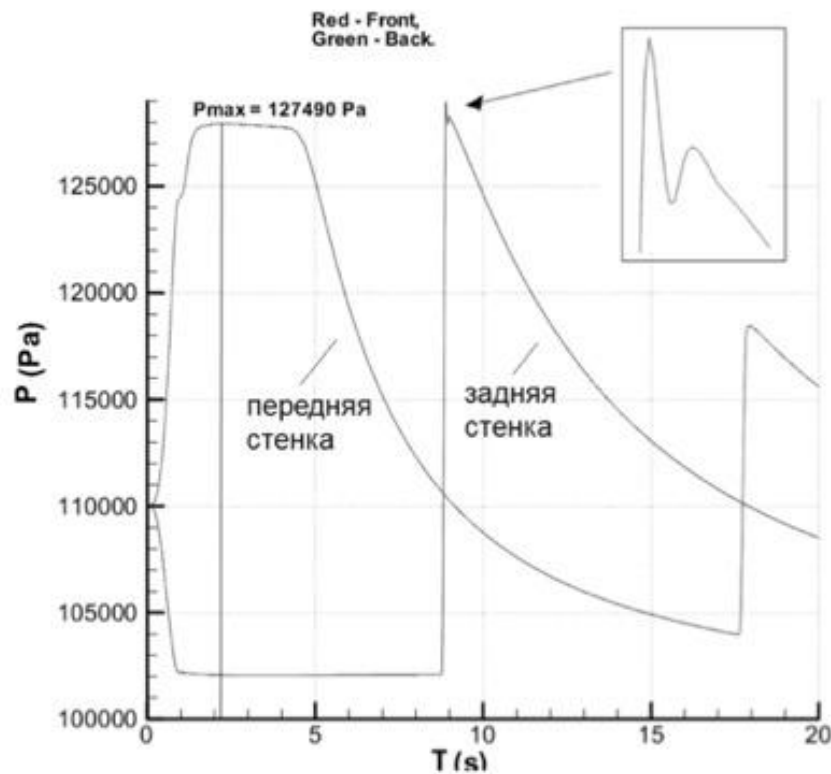
Изменение скорости движения судна



# Колебания жидкости в танке при соударении судна со льдом

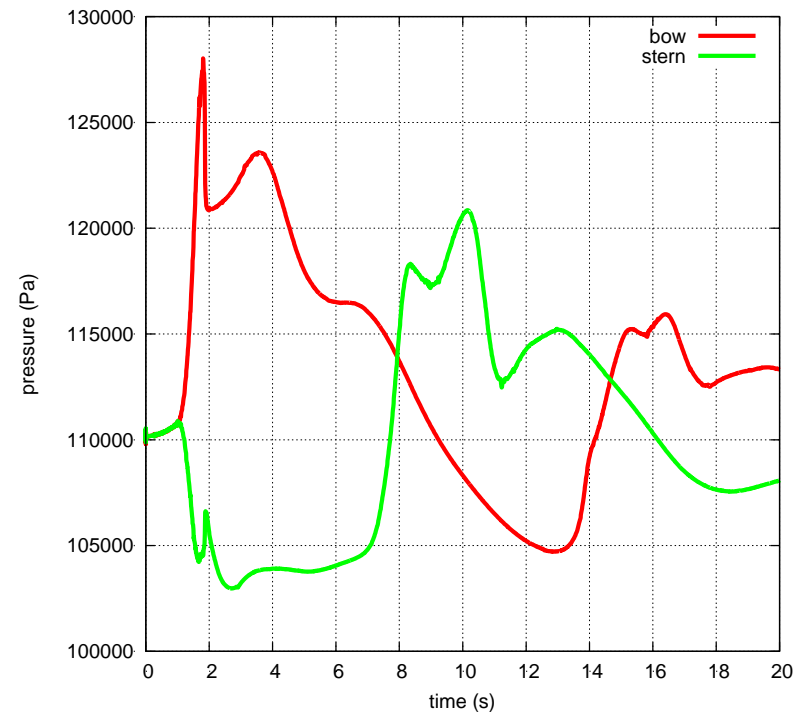


# Колебания жидкости в танке при соударении судна со льдом



Shallow water equations

Elizarova T.G.<sup>1</sup>, Saburin D.S.<sup>2</sup>



Navier-Stokes equations

Tryaskin N., Tkachenko I.<sup>3</sup>

# Заключение

1. Внедрение суперкомпьютерных технологий (СТ) позволило перейти на качественно новый уровень решения задач корабельной гидродинамики и описания физических процессов (гидрофизические поля – гидродинамика корабля).
2. СТ позволили снизиться затраты на лабораторный эксперимент.
3. СТ открывают возможности решения сопряженной задачи геофизические поля – гидродинамика корабля – динамика корабля.



Спасибо за внимание!

# Математическая модель

- Уравнение неразрывности

$$\nabla_{\mathbf{x}_i} \bar{u}_i = 0$$

- Уравнения Навье-Стокса

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right] + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \tau_{ij}^{SGS} - \frac{1}{r_a} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + g_i \frac{(r - r_0)}{r_a}$$

- Уравнение переноса скаляра (объемной фракции жидкости VOF)

$$\frac{\partial \bar{f}}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{f}}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ D \frac{\partial \bar{f}}{\partial x_j} \right] - J_j^{SGS} \quad \frac{\nabla_{\mathbf{t}} \bar{f}}{\nabla_{\mathbf{x}_j} \bar{f}} + \bar{u}_j \frac{\nabla_{\mathbf{t}} \bar{f}}{\nabla_{\mathbf{x}_j} \bar{f}} = 0$$

- Модели турбулентности

- URANS**:  $k$ - $\epsilon$ , SST, RSM, ...

- LES**: Smagorinsky, Dynamic Smagorinsky, Dynamic Mixed

Reynolds averaging (URANS):

$$\bar{f}(\bar{\mathbf{x}}, t) = \frac{1}{T} \int_0^T f(\bar{\mathbf{x}}, t) dt$$

Space filtering (LES):

$$\bar{f}(\bar{\mathbf{x}}, t) = \int_V f(\bar{\mathbf{x}} - \bar{\mathbf{s}}, t) F(\bar{\mathbf{s}}) d\bar{\mathbf{s}}$$