

Опыт использования OpenFOAM® для решения инженерных задач в университете Росток

И.В. Шевчук, Н.В. Корнев

Кафедра численного моделирования

Университет Росток

Германия

Кафедра:

- 10 научных сотрудников, техник и секретарь
- Заведующий кафедрой: д.т.н. проф. Корнев Н.В.

Вычислительные ресурсы:

- Кластер 2700 процессоров CPU
+ 2400 GPU процессоров
- Кластер 96 процессоров
- Дополнительно ожидается приобретение кластера 3000 CPU процессоров в конце 2013 года



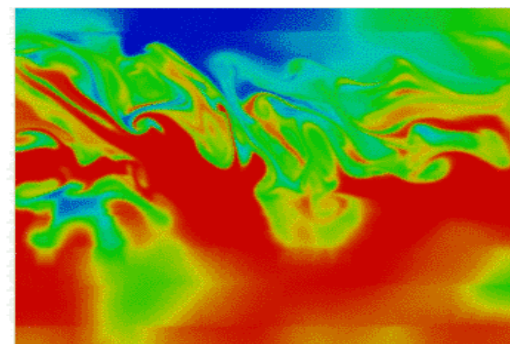
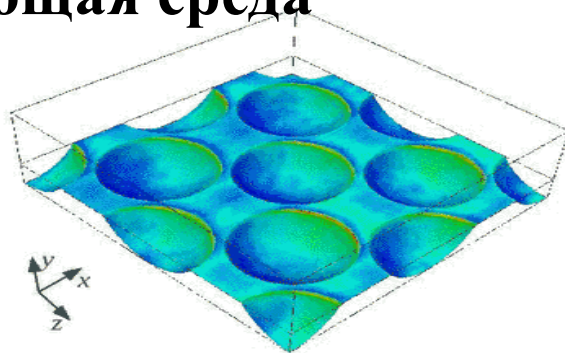
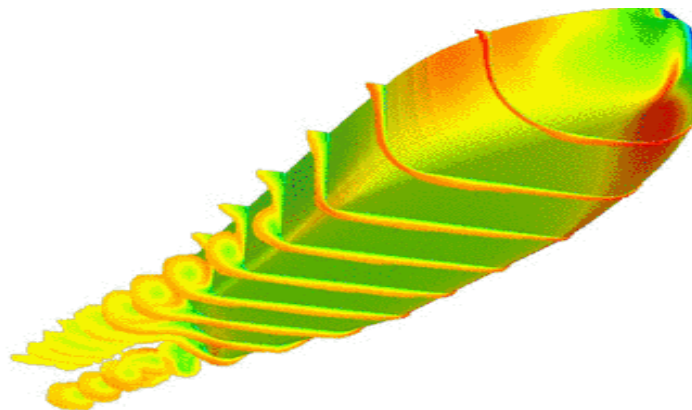
Исследования на кафедре ведутся в 4-х основных направлениях :

1. Задачи судостроения

2. Задачи теплообмена

3. Задачи с химически реагирующими потоками

4. Тепловое взаимодействие системы человек - окружающая среда



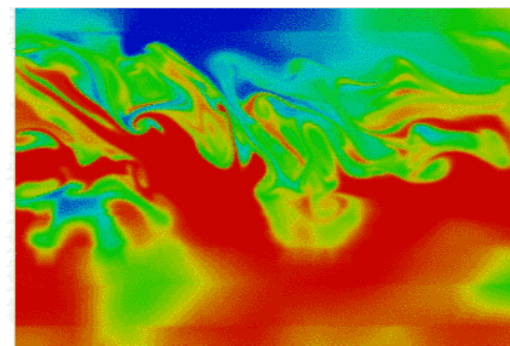
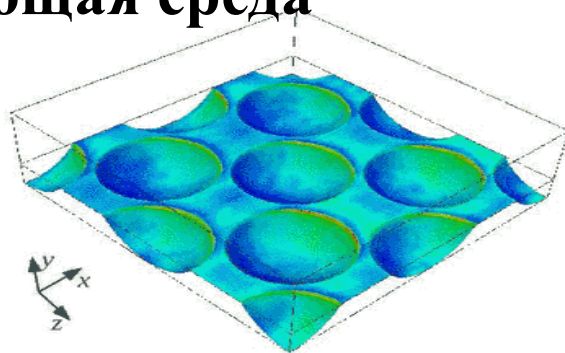
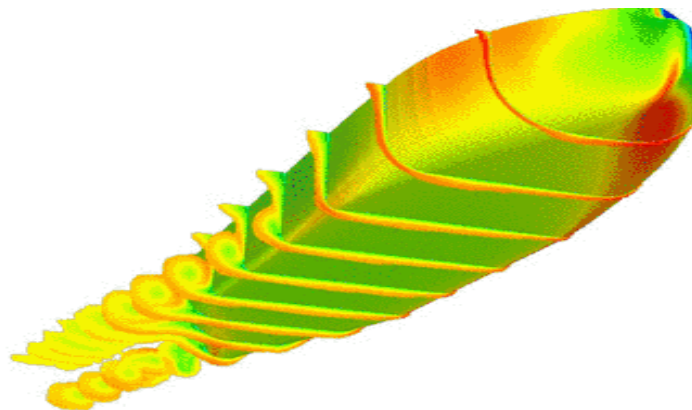
Исследования на кафедре ведутся в 4-х основных направлениях :

1. Задачи судостроения <

2. Задачи теплообмена

3. Задачи с химически реагирующими потоками

4. Тепловое взаимодействие системы человек - окружающая среда

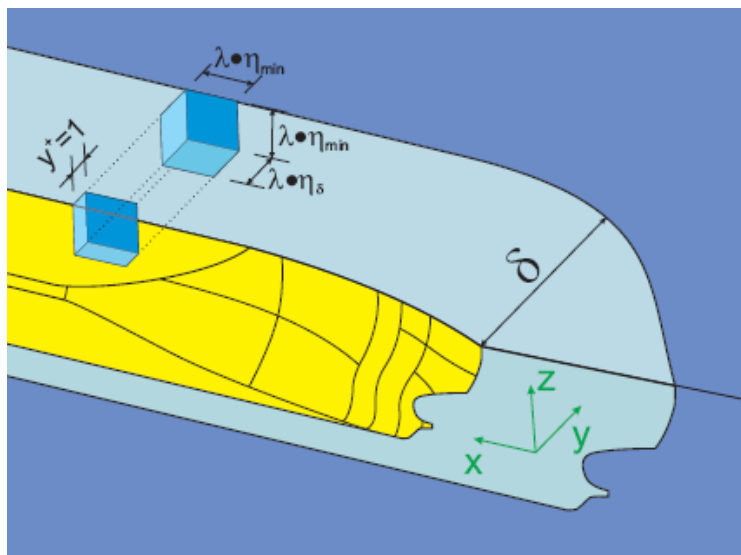


Разработка и применение гибридных RANS-LES методов для задач судостроения

Цель: Моделирование нестационарных эффектов в кормовой оконечности кораблей для более точного прогнозирования вибрации, нестационарных нагрузок на вал и подшипники

Объекты исследований: Полнообводные суда (танкеры), суда на мелководье, обычные суда в режиме манёвра

Проблема: на данный LES в чистом виде практически неприменим даже для обтекания моделей

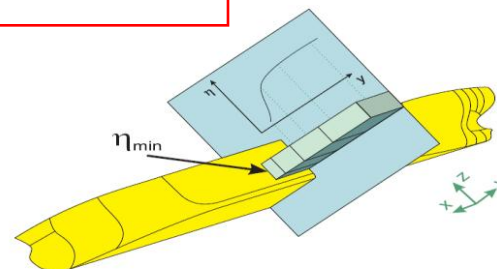


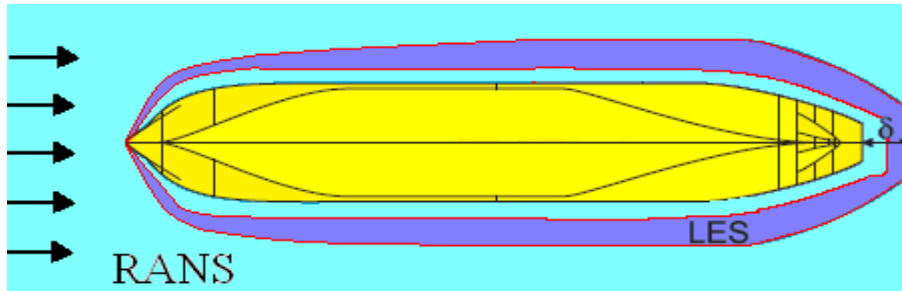
Число Рейнольдса

число ячеек
для кормовой
оконечности

$Re=2.8 \cdot 10^6$	\longrightarrow	$3 \cdot 10^7$
$Re=5.8 \cdot 10^6$	\longrightarrow	10^8

Решение - гибрид!





URANS вблизи стенки, наподобие «пристеночной функции»

Уравнения URANS и LES формально подобны.
Различия:
Фильтрация \square Осреднение по времени
Различные напряжения

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

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

Одни и те же уравнения решаются во всей области

Напряжения рассчитываются по модели Германо в LES области и по одной из моделей замыкания турбулентности в URANS области

Задача: как динамически выбрать области LES и URANS?

Простое решение:

Интегральная длина > размер ячейки



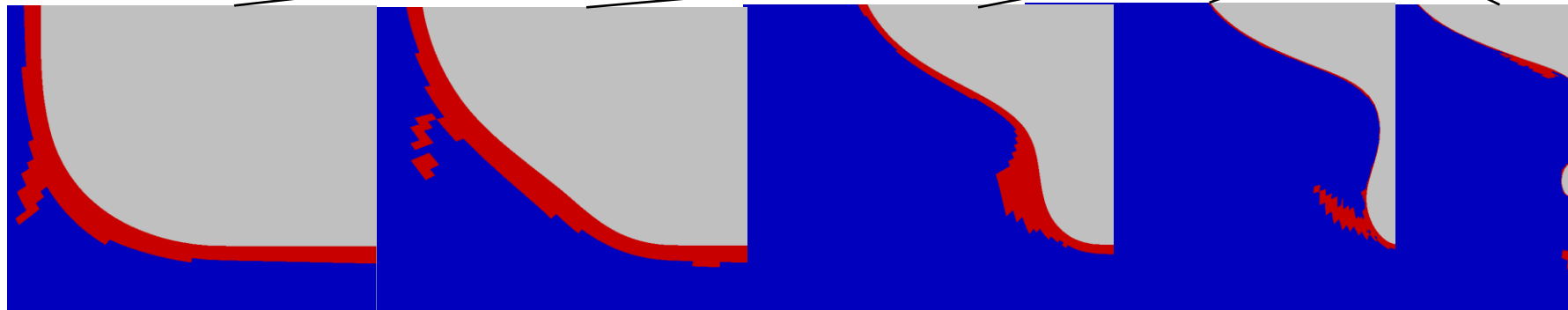
LES



$$L = 0.168 k^{3/2} / \epsilon$$

Интегральная длина < размер ячейки

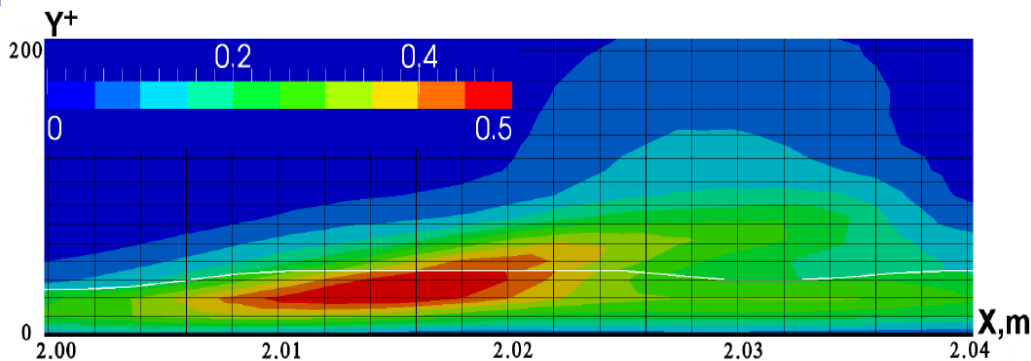


URANS

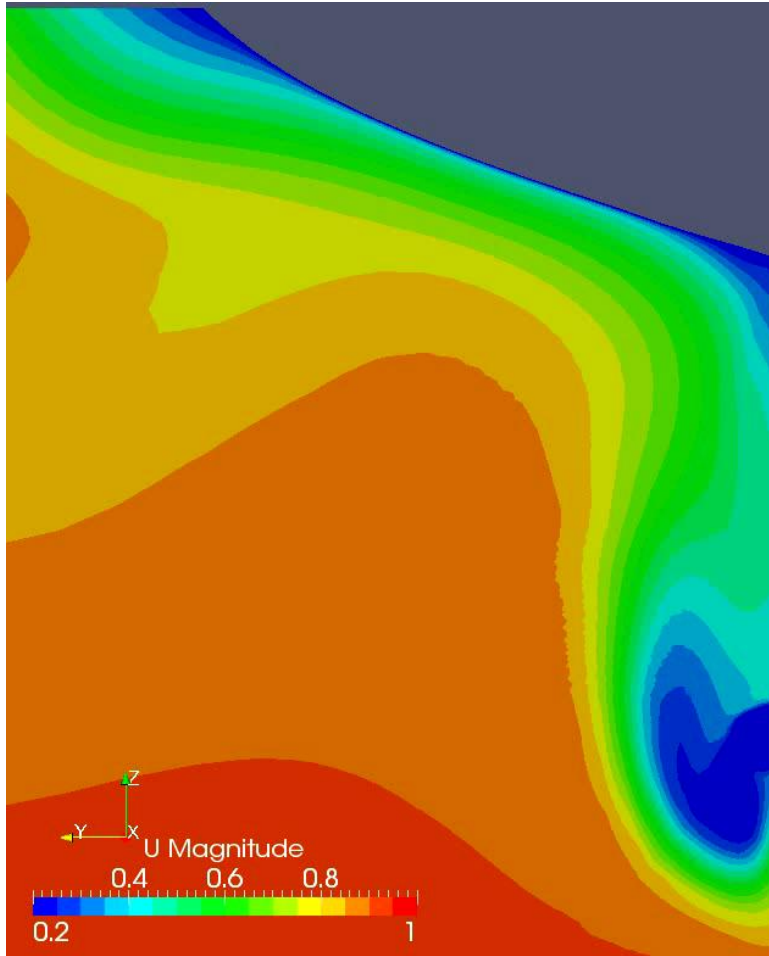


 - LES  - RANS

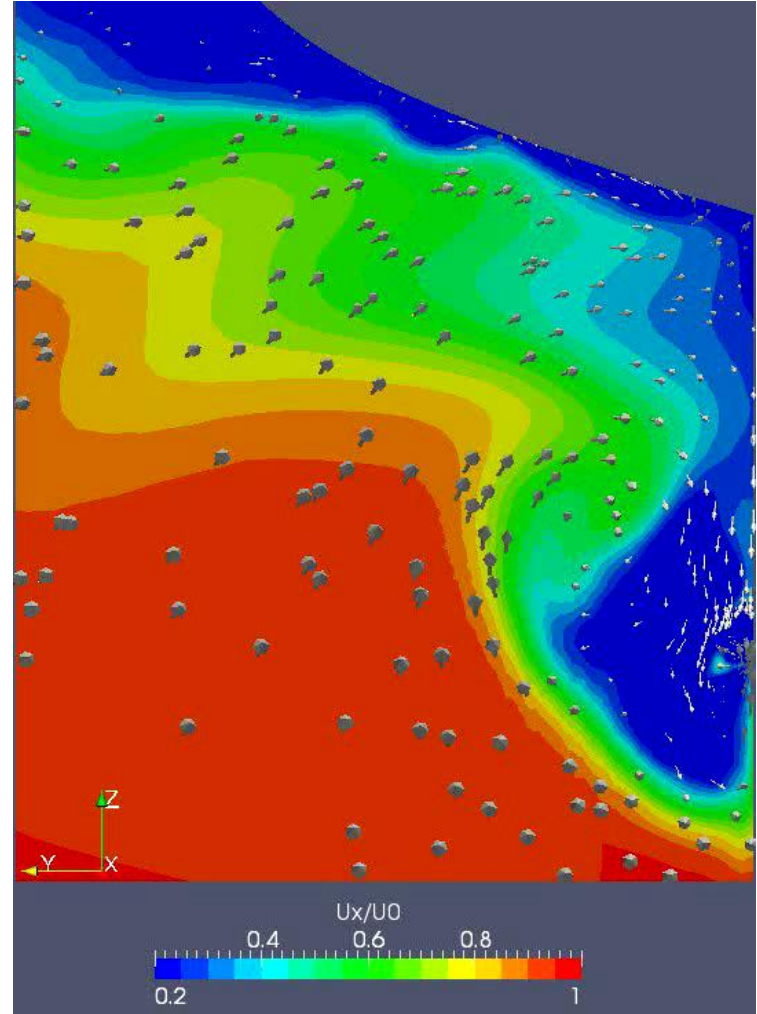
Непрерывность турбулентной кинетической энергии на интерфейсе (главная проблема гибридов) обеспечивается сглаживанием турб. вязкости



$$v(L) = \frac{v_t - v_{SGS}}{\pi} \arctan\left(100 \left(\frac{L}{\Delta} - 1\right)\right) + \frac{1}{2}(v_t + v_{SGS})$$



URANS

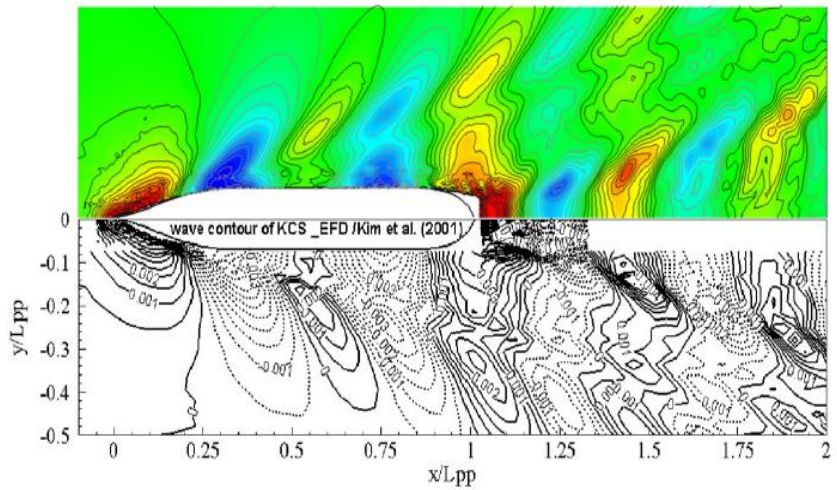


Hybrid

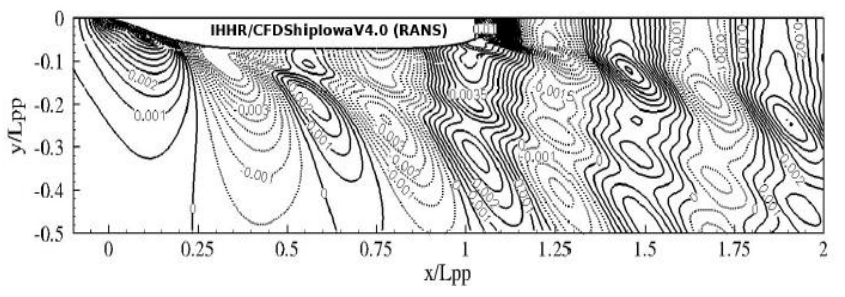
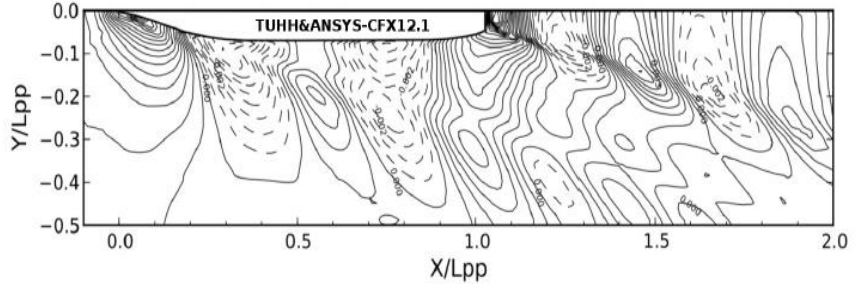
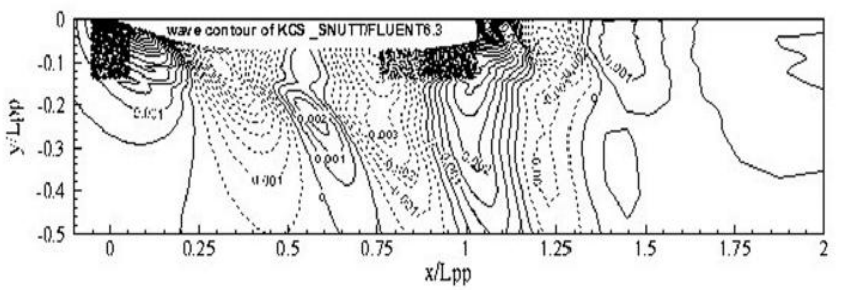
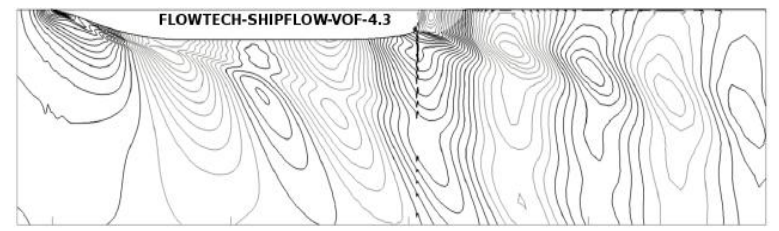
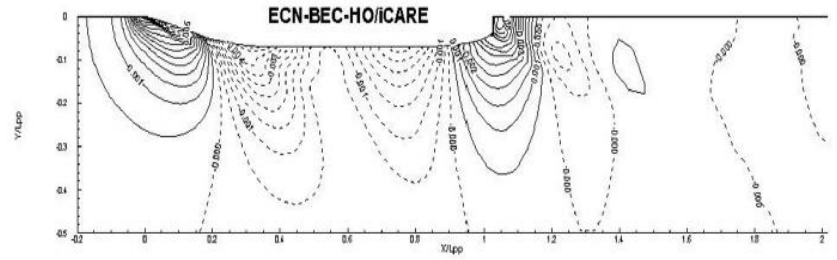
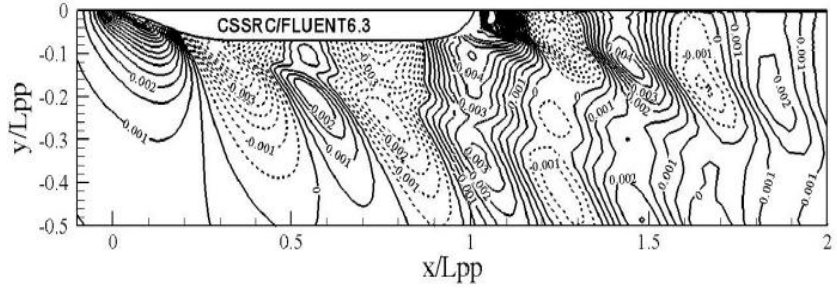
- Гибридная модель была имплементирована для OpenFOAM-1.6-ext
- Над валидацией модели работало несколько групп CFD специалистов в области судостроения (в т.ч. из фирмы Voith). Работа этих групп способствует изменению пока все еще настороженного отношения судостроителей к OpenFOAM. Некоторые результаты для гибридной модели:

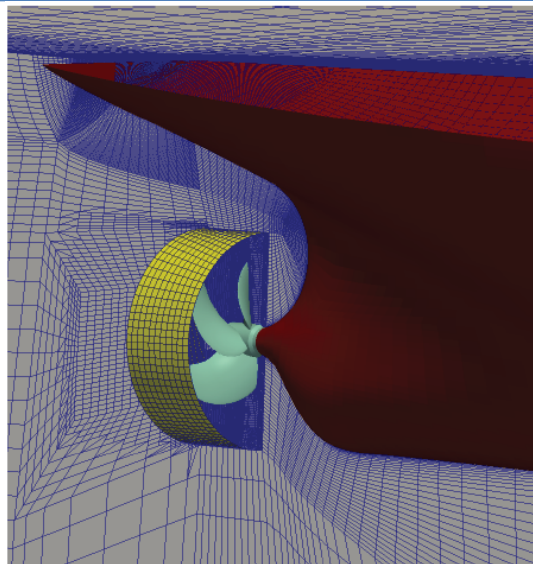
grid	method	resistance	error
	KRISO Exp.	81.48 N	
8.6×10^5	<i>k</i> - ω SST	86.0 N	+5.5%
	hybrid	84.6 N	+3.8%
1.05×10^6	<i>k</i> - ω SST	83.4 N	+2.3%
	hybrid	79.1 N	-2.9%
1.51×10^6	<i>k</i> - ω SST	82.87 N	+1.71%
	hybrid	80.07 N	-1.73%
1.73×10^6	<i>k</i> - ω SST	83.17 N	+2.07%
	hybrid	81.53 N	+0.06%

Расчёт сопротивления для контейнеровоза KCS



Experiment (MOERI, Kim et al. 2001)





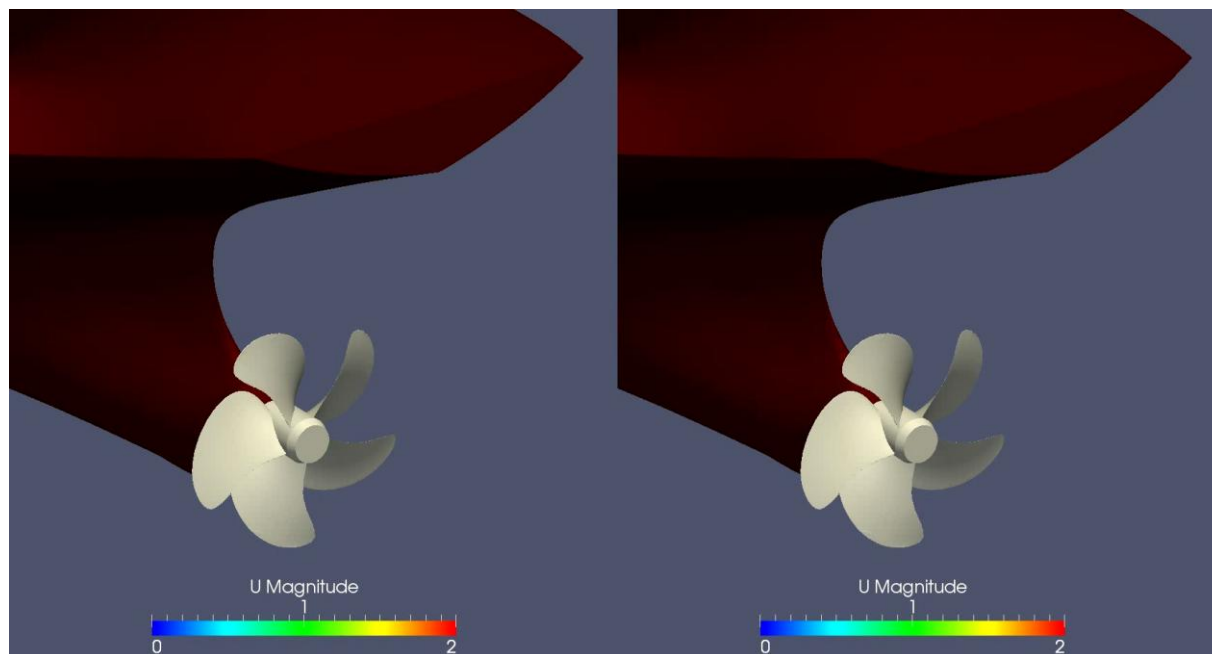
- **pisoFoam 1.6-ext**
- **2 Mio ячеек во вращающемся пропеллерном блоке**
- **2 Mio ячеек в основной сетке**
- **$y+ 0.1...4$ в области кормы, $y+ 1... 10$ в носовой части**
- **Max. $Co = 0.6$**
- **Шаг по времени 0.0005 s.**
- **Центральные разности в пространстве, Crank-Nicholson по времени**

hybrid $k-\omega$ -SST + Модель Германо

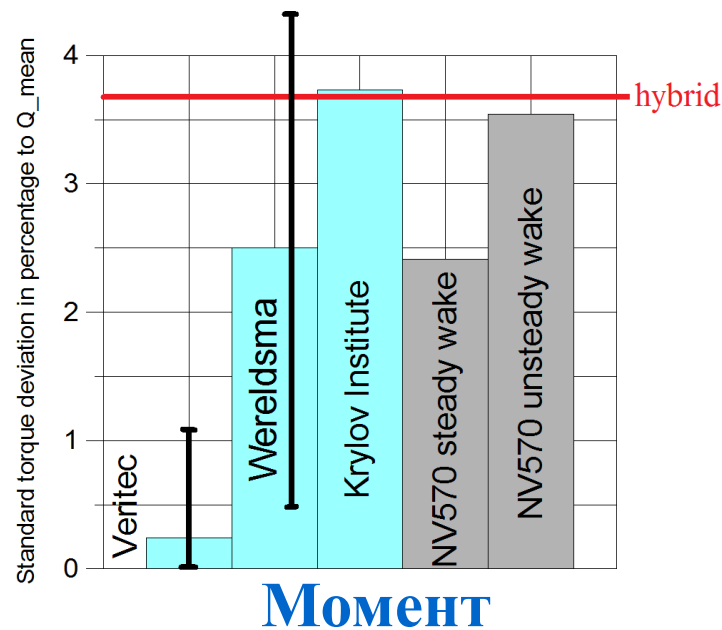
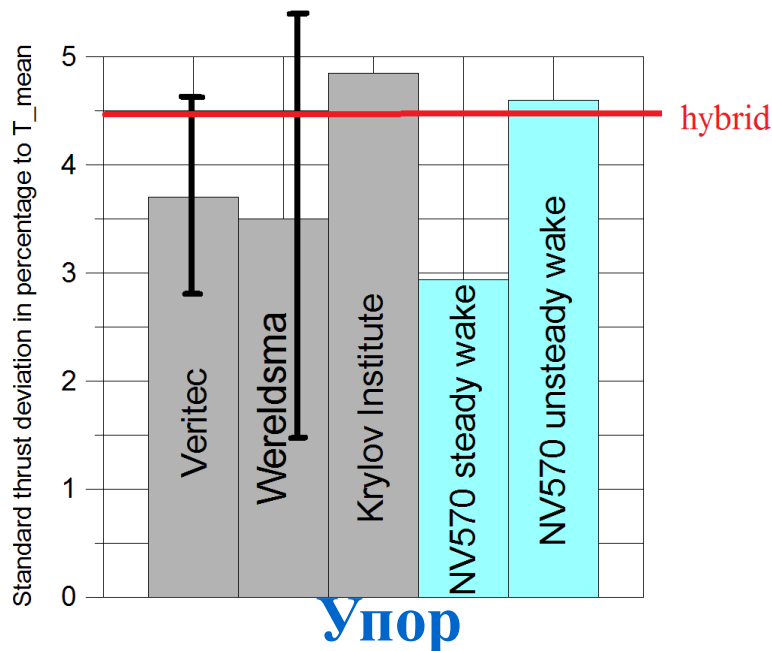
URANS: $k-\omega$ -SST

λ_2 - изоповерхности

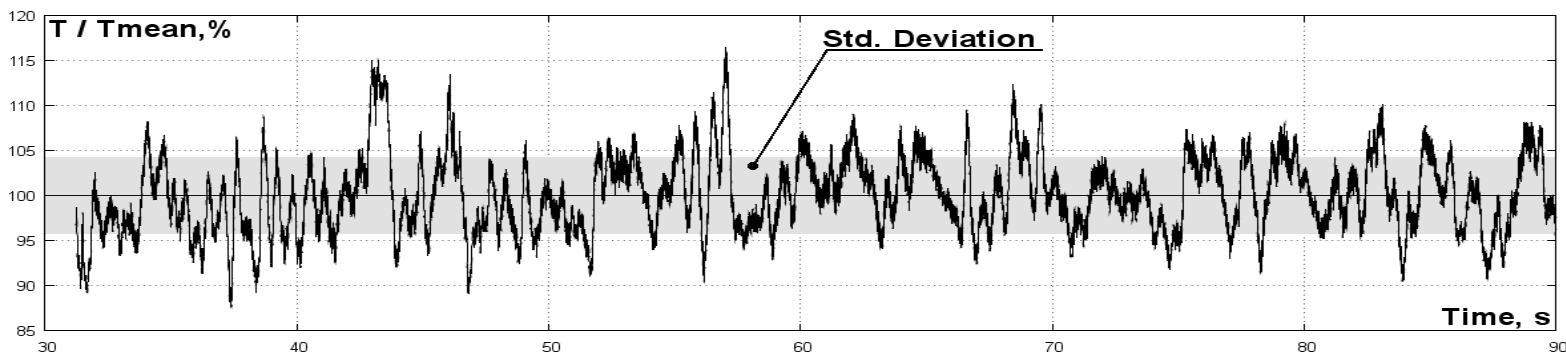
Начало
моделирования: 0 s. - 1 s.



Среднеквадратическое отклонение упора и момента от среднего значения (около 4 %) хорошо предсказывается инженерными методиками, особенно методикой ЦНИИ Крылова .



Но пиковые нагрузки (около 16 %) идентифицируются только с помощью гибрида.



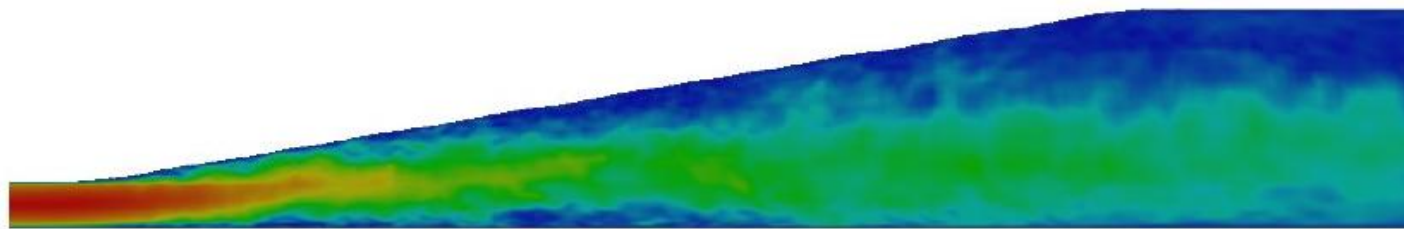
Мотивация:

Превышение допустимых норм вибрации в кормовой оконечности внутренних круизных судов при движении на малых глубинах – некомфортные условия для пассажиров

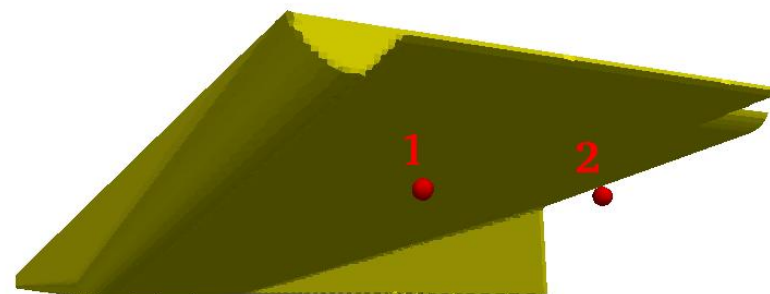


Причины вибрации:

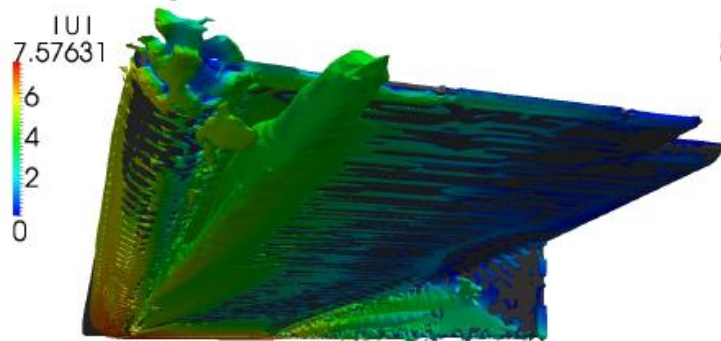
Течение в корме схоже с течением в диффузоре. Перепад давления вдоль корпуса вызывает усиленный отрыв пограничного слоя. Отсоединившиеся вихри являются причиной нестационарных нагрузок на винте.



- Типовое судно, по форме и размерам идентичное реальному
- Два числа Фруда по глубине, $Fn_H = 1.1, 1.2$
- pisoFoam 1.6-ext
- Hybrid URANS/LES, URANS
($k-\omega$ -SST + модель Германо)
- 2.2 Млн. Ячеек, $y^+ = 30$

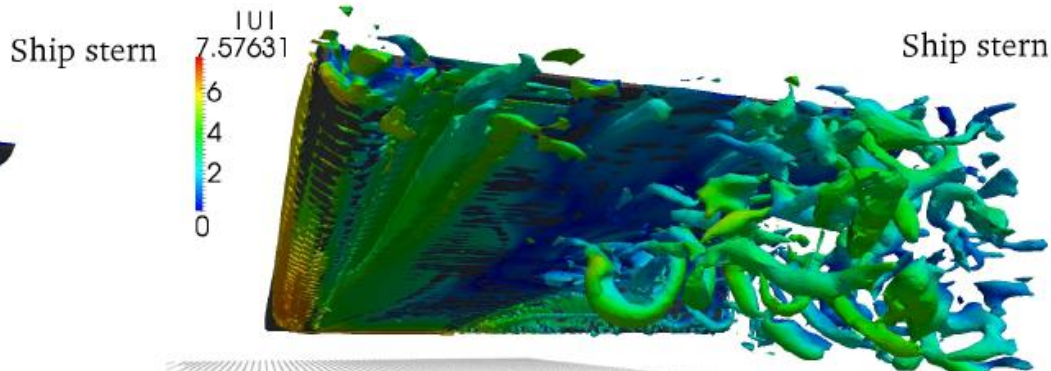


Stern



Bottom

URANS

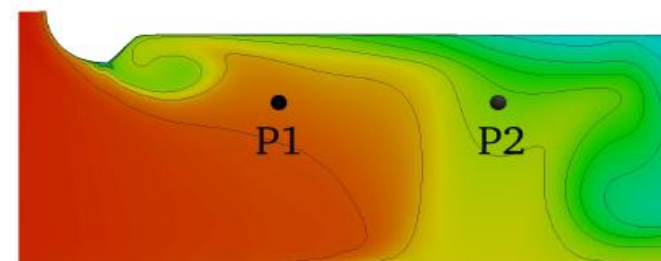
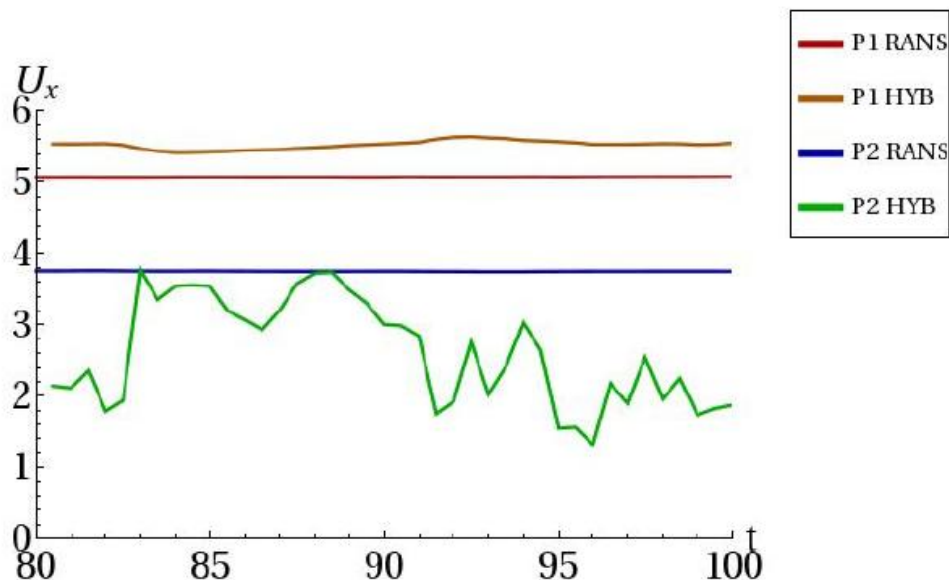


Bottom

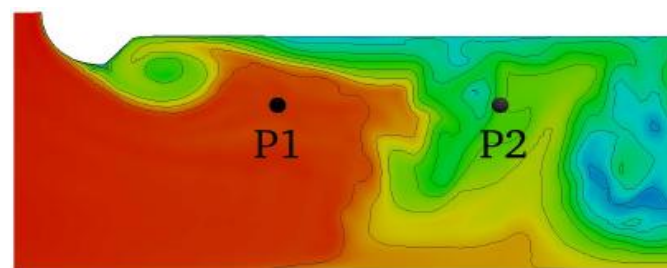
Hybrid

λ_2 изоповерхности, $Fn_H = 1.2$

- Осцилляции продольной скорости в ходе расчёта были “замерены” в точках расположения гребных винтов
- Отрыв пограничного слоя в случае $F_nH = 1.2$ вызвал 30% осцилляции скорости (гибрид)



URANS



Hybrid

- В данный момент проводятся расчёты двухфазной модели
- Получение экспериментальных данных планируется в ходе сотрудничества с Neptun Werft Rostock

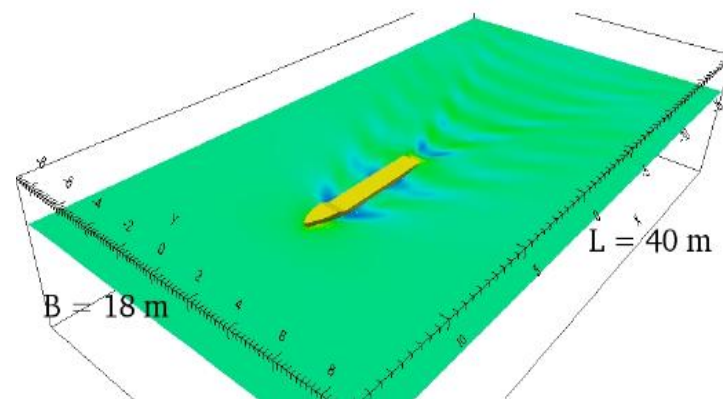
Мотивация:

Необходимо для судов проходящих по ограниченным фарватерам — для избежания посадки на мель

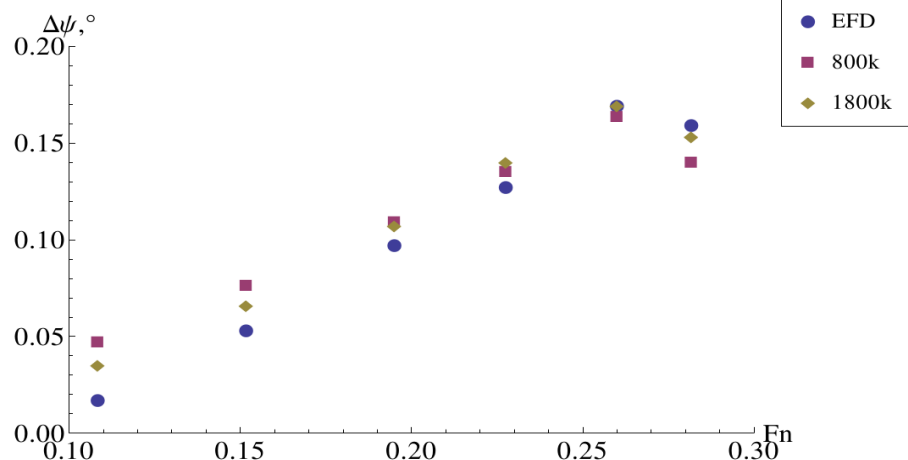
Валидация OpenFOAM

KCS MOERI Model: $L = 7.28\text{m}$, $B = 1.02\text{m}$, $T = 0.34\text{m}$

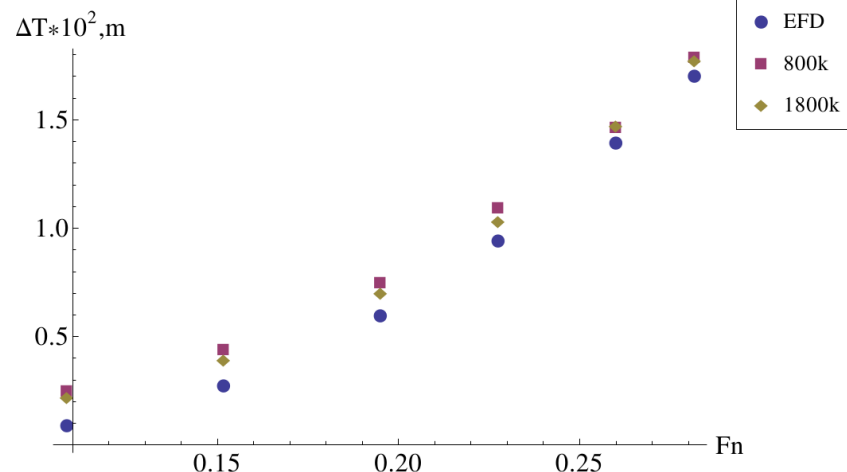
- Диапазон $Fn = 0.1 - 0.28$
- interDyMFoam 2.1.x
- Сравнение с экспериментальными данными Gothenburg Workshop 2010



Дифферент

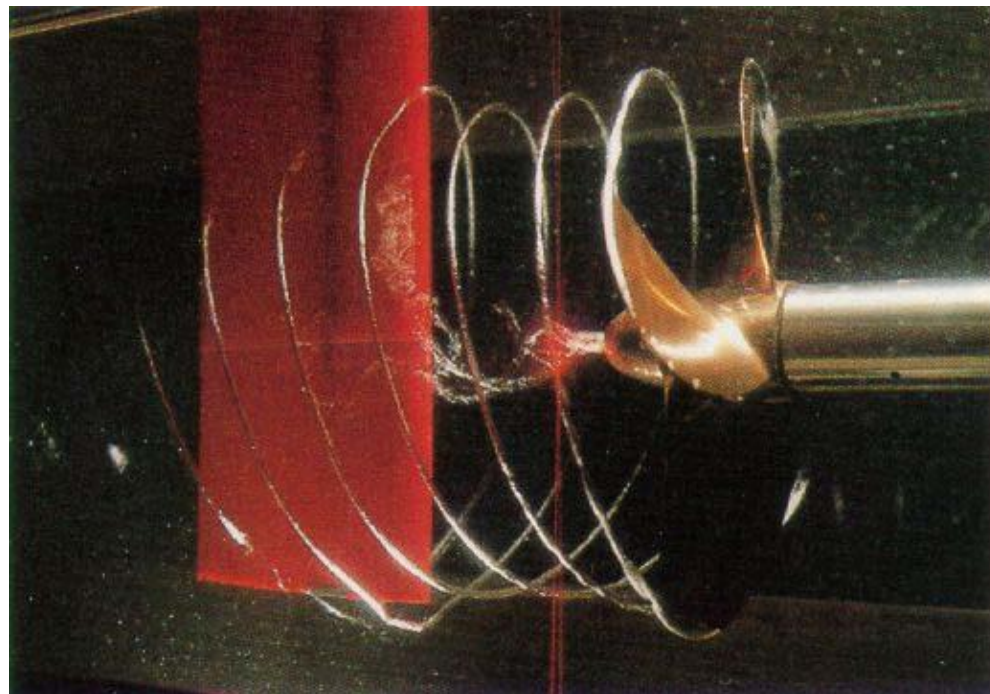


Осадка



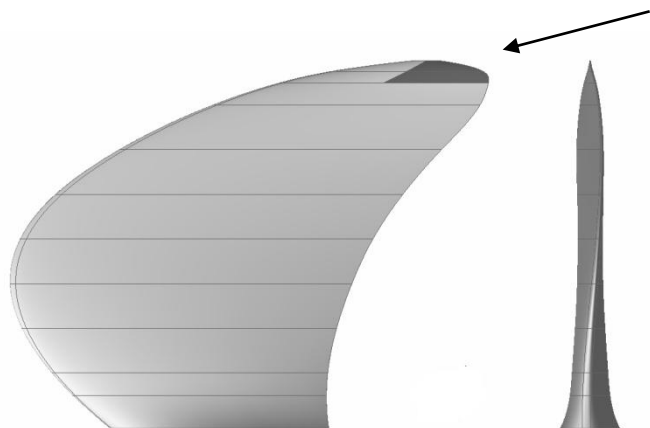
Мотивация

Возникновение кавитации в концевых вихрях вызывает эрозию поверхности руля. Необходимы меры по снижению кавитации

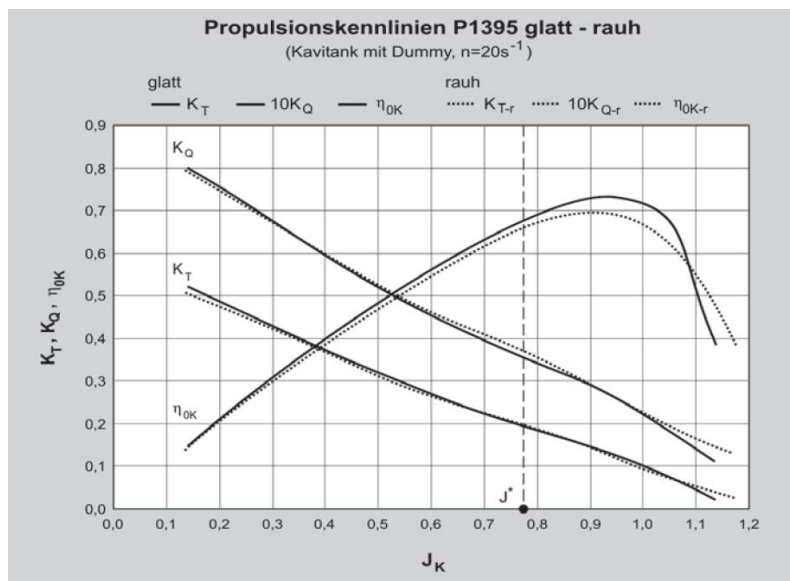


Решение:

Нанесение шероховатости на концевую часть лопасти пропеллера



Расположение шероховатости на лопасти винта



Нанесение шероховатости

Минусы:

- Незначительно снижает эффективность винта (1-2%)
- Незначительно увеличивает сопротивление винта (на 1-10%)

Плюсы:

- Давление в концевом вихре повышается на 10-18%, что делает использование шероховатости оправданным.
- Понижает уровень кавитационного шума
- Снижает осцилляции давления на корпусе
- Может быть использована уже после постройки

Open water results with and without tip roughness [Philipp, Ninnemann, 2005]

Основные задачи исследования

- Понимание физики процесса. Почему давление внутри вихря повышается при нанесении шероховатости?
- Подбор оптимальных параметров шероховатости

Проводятся параллельные экспериментальные и численные исследования

Параметры расчёта

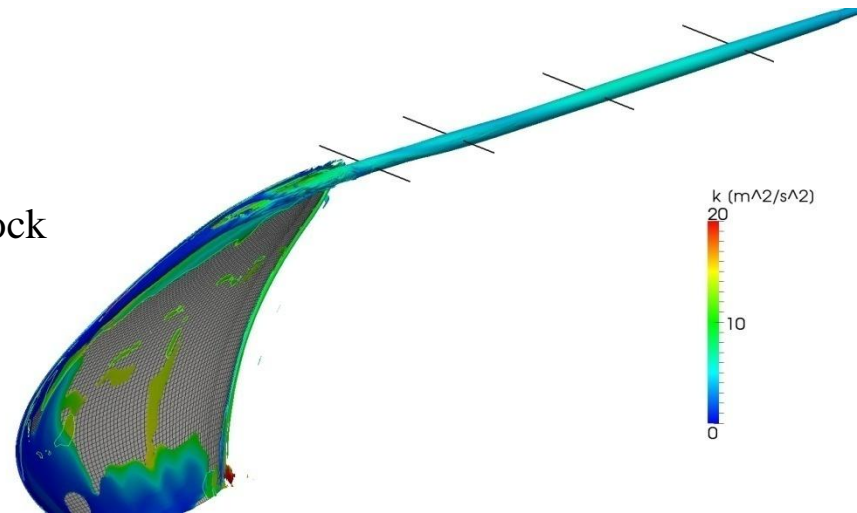
- BS ICEM 19 млн. ячеек
- Решатель simpleFoam (RANS)
- k-w SST модель
- Гладкая лопасть: низкорейнольдсовая модель / пристеночные ф-ции
- С шероховатостью: пристеночные ф-ции



Экспериментальная установка

Дозвуковая аэродинамическая труба в Uni Rostock
 Поперечное сечение 2 кв.м.

Измерения с помощью трубки Прандтля,
 3D Hot Wire



Первые результаты расчётов

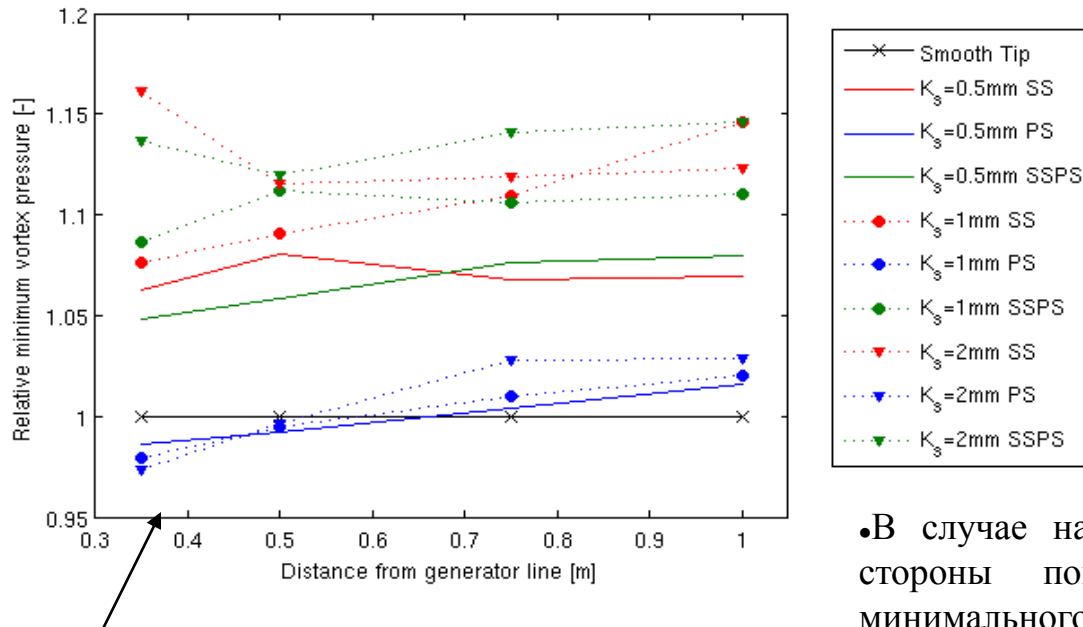


Рис. Минимум давления в вихре в зависимости от расстояния до лопасти для разных диаметров зёрен песка и различных способов нанесения

PS – шероховатость со стороны повышенного давления

SS – шероховатость со стороны пониженного давления

SSPS – с обеих сторон

Проведены расчёты с использованием различных способов нанесения шероховатости, различной крупностью зёрен и замерены характеристики потока в вихре.

Расчёт показал:

- Максимальное снижение эффективности всего 2.8 % (lift-to-drag)

- В случае нанесения шероховатости на лопасть со стороны повышенного давления – понижение минимального давления в вихре на 2.7% (отриц. эффект)

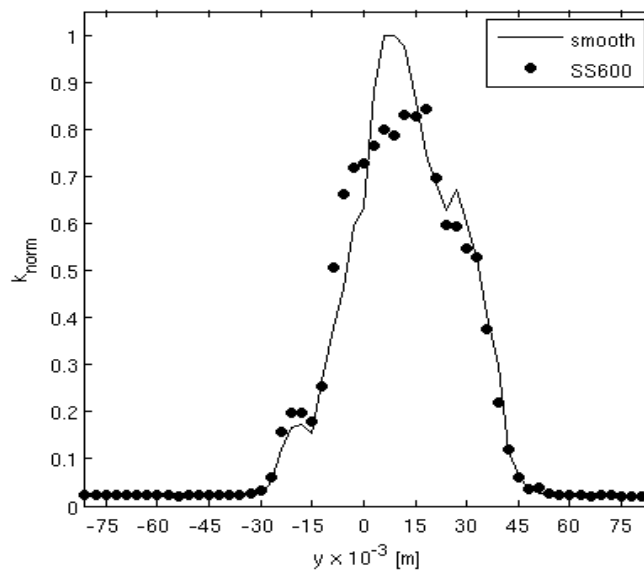
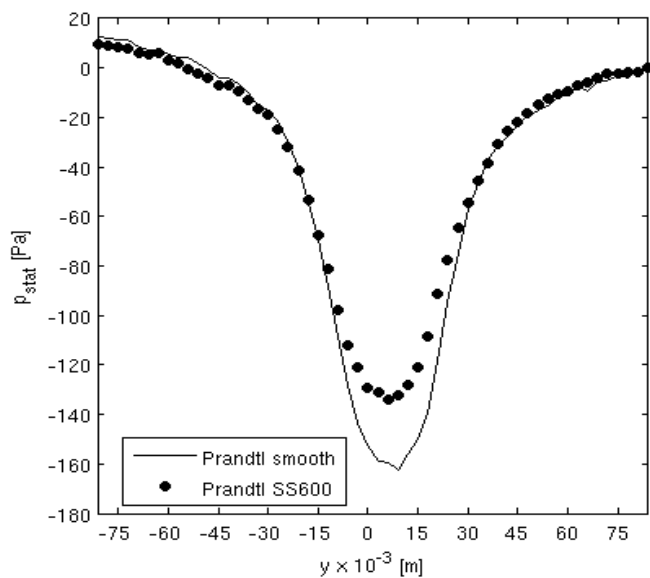
- При использовании со стороны пониженного давления – повышение давления в вихре на 16.1%

В ходе расчёта также был выявлен факт увеличения давления в вихре при нанесении шероховатости на лопасть со стороны низкого давления

Результаты эксперимента в Uni-Rostock

Исследовалась шероховатость с зерном 0.6 мм, нанесённая на сторону лопасти с пониженным давлением

- снижение эффективности **2.80%**
- снижение скорости в центре вихря **10.83%**
- снижение турбулентной кинетической энергии в вихре **15.74%**
- повышение давления в вихре на **17.72%** (**16.1%** - расчёт)



Мотивация

- Являются аэродинамически эффективными
- Могут преодолевать большие расстояния
- Обладают амфибийными свойствами
- В данный момент широко не используются в связи с проблемами динамической устойчивости полёта



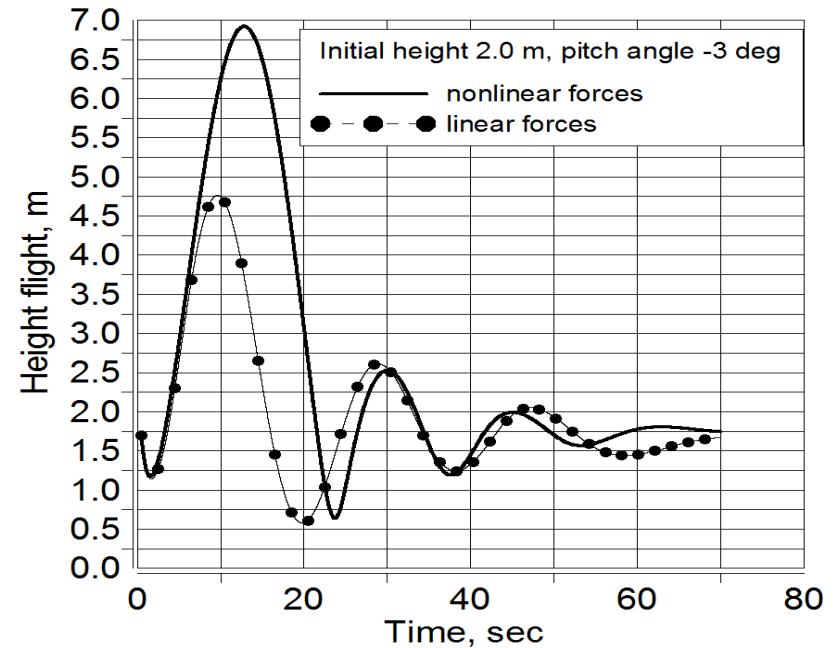
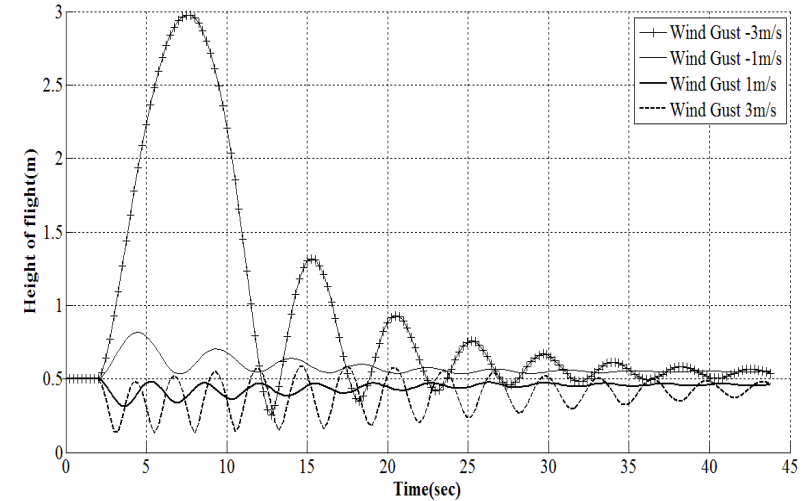
«Каспийский монстр»

Методы используемые на данный момент:

- Линеаризованные уравнения
- Течение жидкости считается потенциальным
- Не учитывают существенную нестационарность и нелинейность
- Дают чрезмерно оптимистичный прогноз



Возникают проблемы с динамической устойчивостью



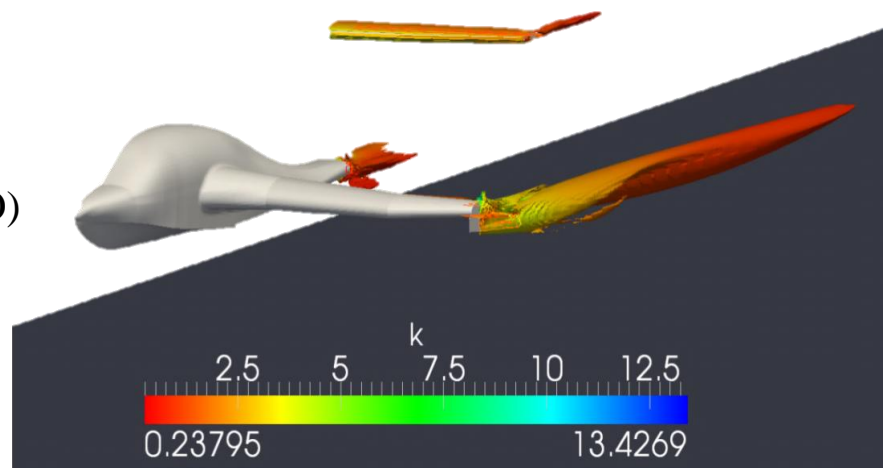
Исследования проводятся в рамках сотрудничества м/у

- Chair of Modeling and Simulation (URO)
- Institute of Automation (URO)
- Washington State University

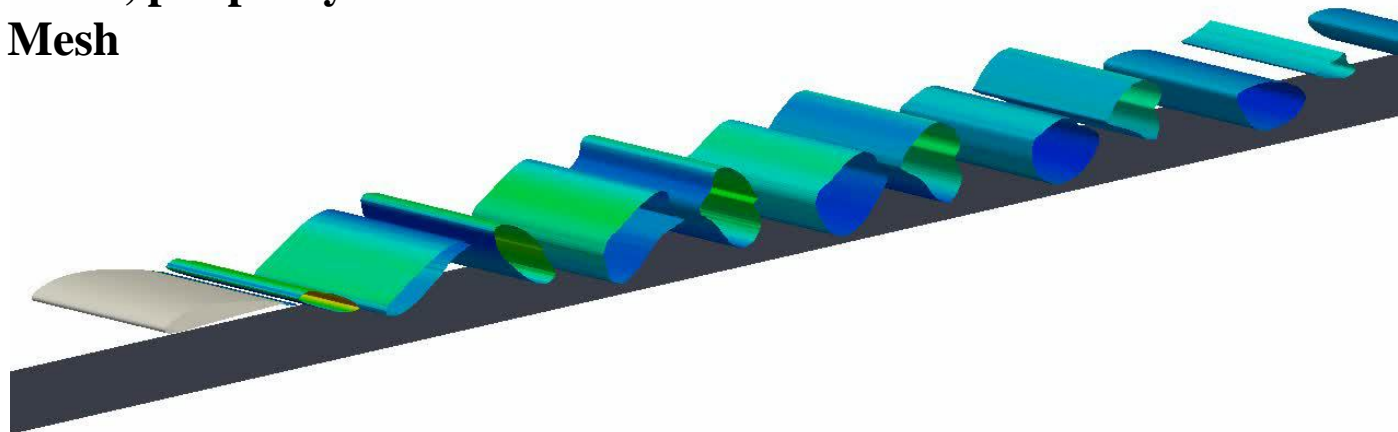
Цели проекта

- Нестационарное моделирование динамики экраноплана с тремя степенями свободы и системой автоматического контроля

pimpleFoam, pimpleDyMFoam
ICEM Mesh



- Разработка системы автоматического управления для обеспечения устойчивости



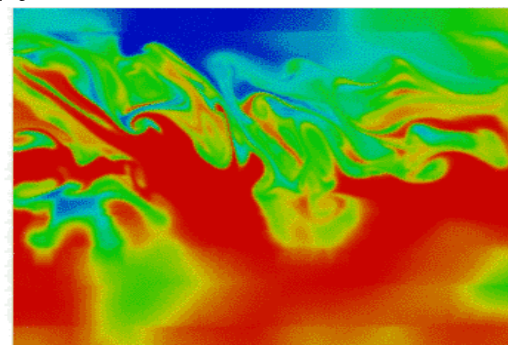
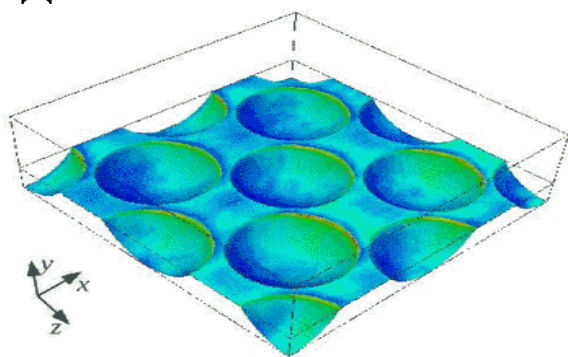
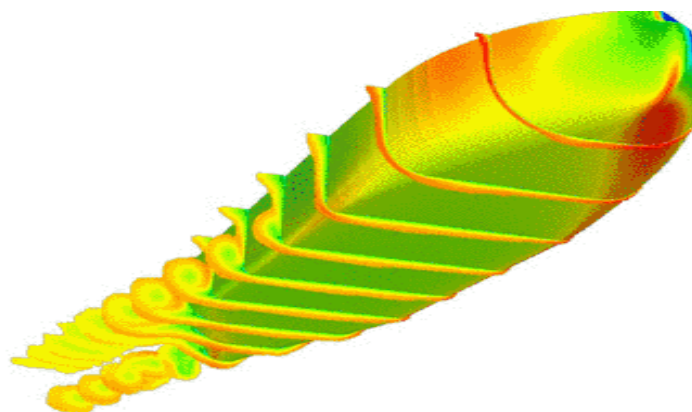
Исследования на кафедре ведутся в 4-х основных направлениях :

1. Задачи судостроения

2. Задачи тепломассообмена <

3. Задачи с химически реагирующими потоками

4. Взаимодействие системы *человек - окружающая среда*



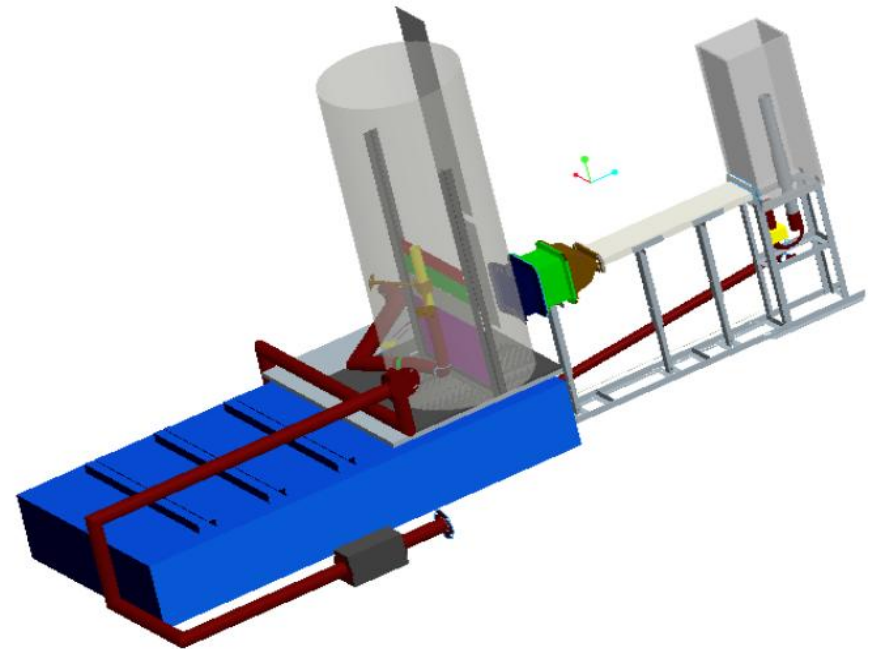
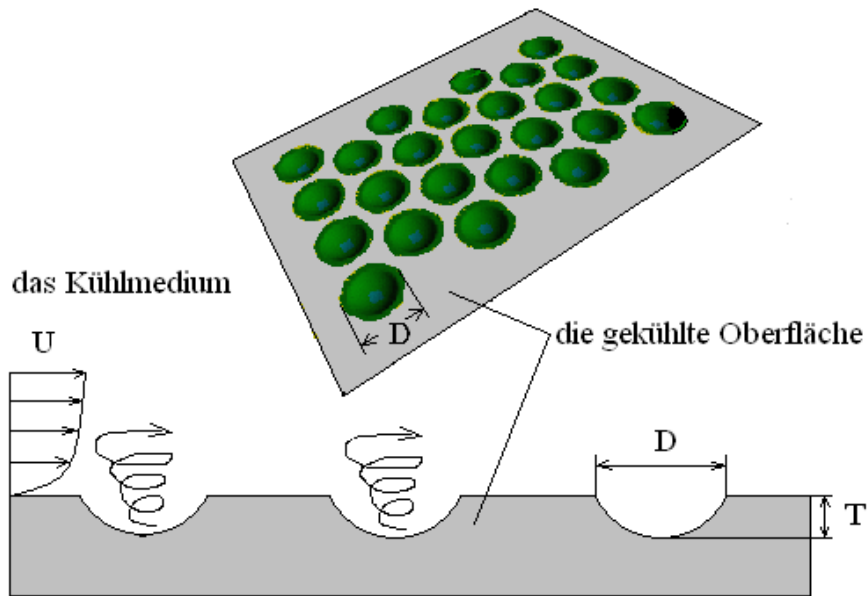
Теплообменники с луночными поверхностями



Достоинство:

Значительное усиление теплообмена при умеренном дополнительном гидравлическом сопротивлении

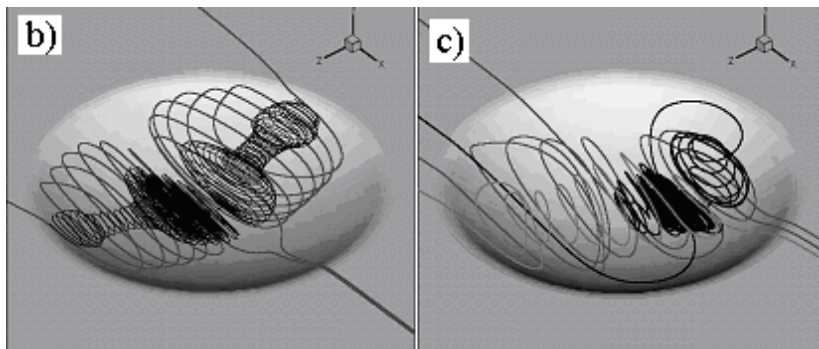
Выполнены параллельные экспериментальные и численные (OpenFOAM, LES) исследования



Главный результат численного моделирования: Понимание физики гидродинамических и термодинамических процессов протекающих в теплообменниках

Первоначальные представления о физике течения

URANS:



$T/D = 0.13$

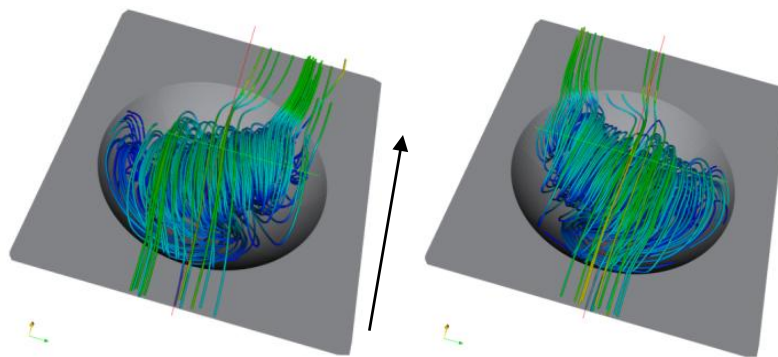
$T/D = 0.26$

Устойчивая стационарная несимметричная торнадоподобная структура

Физика течения, выявленная с помощью LES

LES:

Осредненные по фазе линии тока

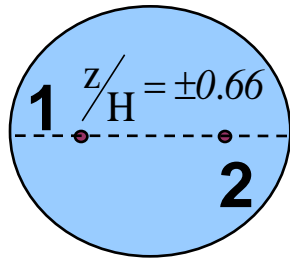


$T/D = 0.26$

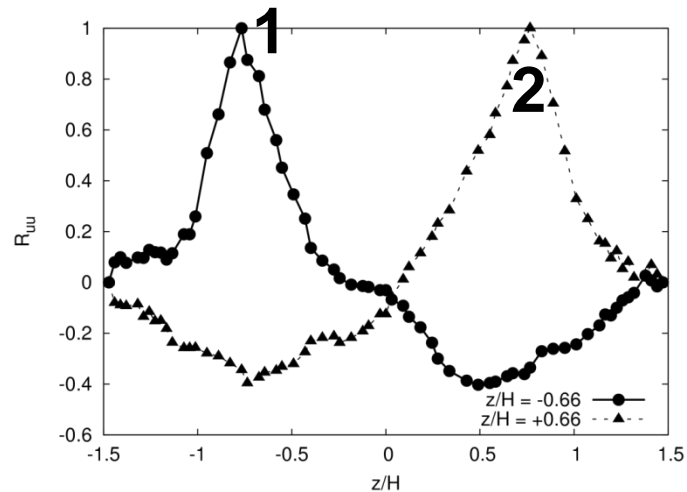
Нестационарная картина мелкомасштабных вихревых структур. При фазовом осреднении в течении 3 сек можно распознать самоорганизующиеся структуры, совершающие колебания во времени

Обнаружение и объяснение противофазных колебаний скорости в лунке, первоначально в численном расчете и затем подтвержденные экспериментально

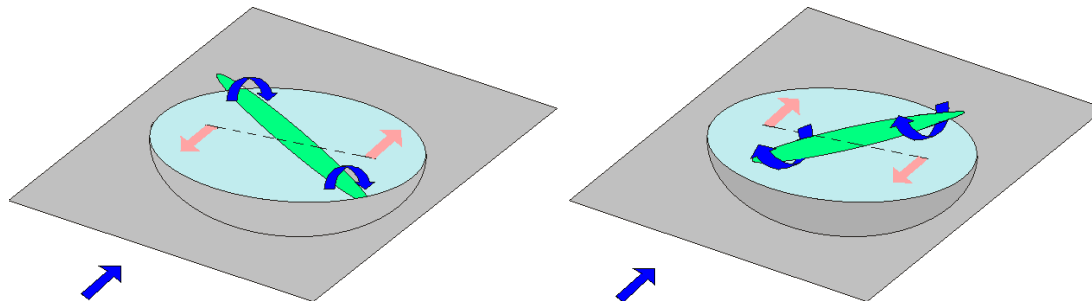
$$R_{uu} = \frac{\langle u_x(x, t) \cdot u_x(x + \Delta x, t) \rangle}{\langle u_x(x, t) \cdot u_x(x, t) \rangle}$$



Autocorrelation function (LES)



Переменная во времени схема расположения вихрей, объясняющая явление



Развитие тематики «Теплообменники» осуществляется в настоящее время в сотрудничестве с фирмой **Gesmex**

Цели: 1. Разработка простых инженерных подходов для расчета пластинчатых теплообменников на основе данных, полученных из RANS-LES, обобщение гибридного RANS-LES подхода для термодинамической задачи

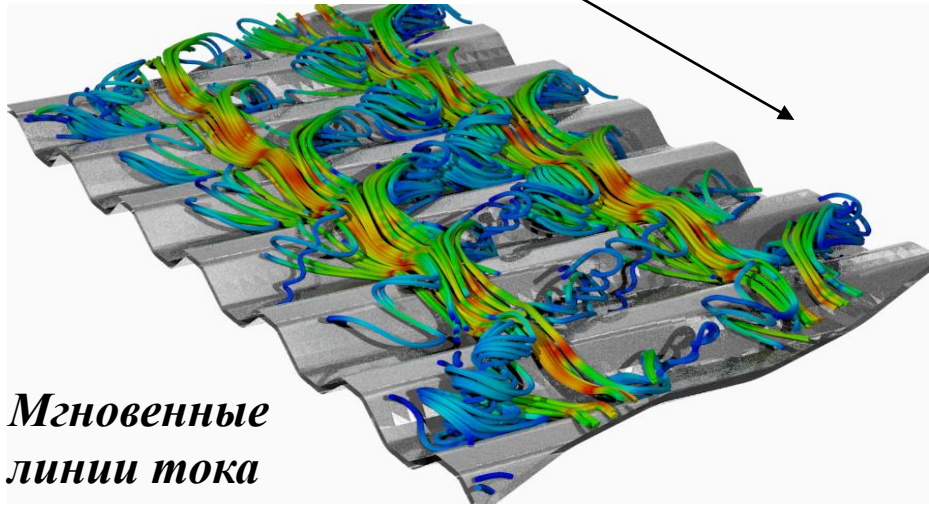
2. Оптимизация формы поверхности с целью увеличения теплоотдачи

Круглые пластинчатые теплообменники – новое поколение теплообменников, позволяющих работать с более высокими градиентами температур и перепадами давлений

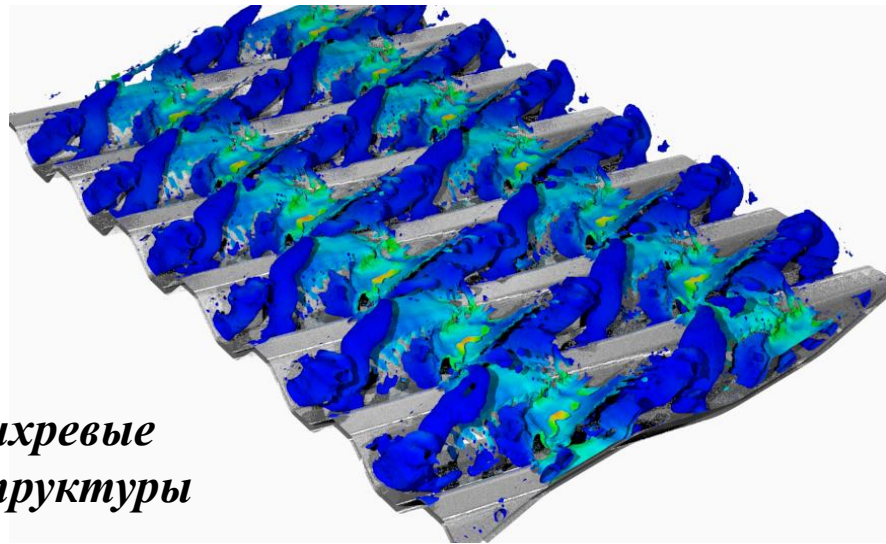


Канал круглого пластинчатого теплообменника

Напр. потока



*Мгновенные
линии тока*



*Вихревые
структуры*

Первые расчёты

isoFoam 2.1 + перенос температуры
Сетка 14млн. ячеек, **snappyHexMesh**

Выявленная с помощью URANS физика течения:

Геометрия канала приводит к образованию основного спиралевидного потока в зазорах между точками соприкосновения пластин

За точками контакта образуется зона рециркуляции, где частицы жидкости движутся по спирали, вращаясь вокруг отклонённой оси

Вихревое движение в области рециркуляции обеспечивает интенсивное перемешивание жидкости с основным потоком

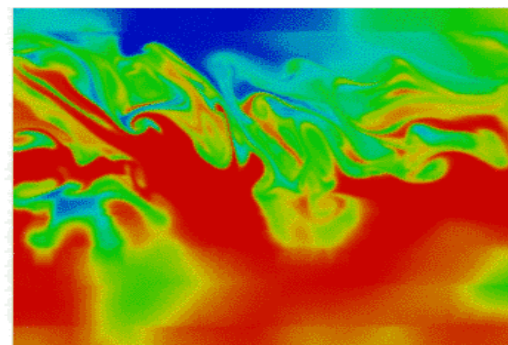
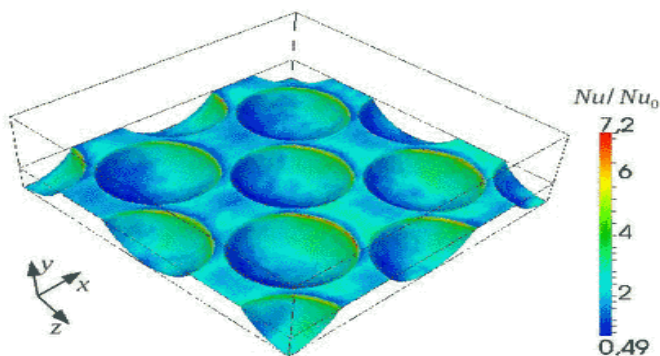
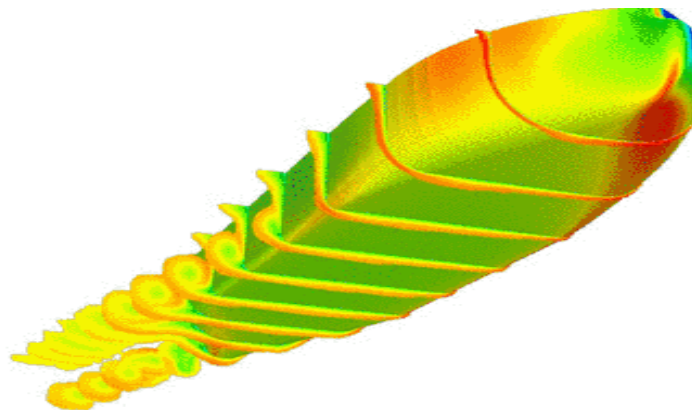
Исследования на кафедре ведутся в 4-х основных направлениях :

1. Задачи судостроения

2. Задачи тепломассообмена

3. Задачи с химически реагирующими потоками

4. Взаимодействие системы человек - окружающая среда <

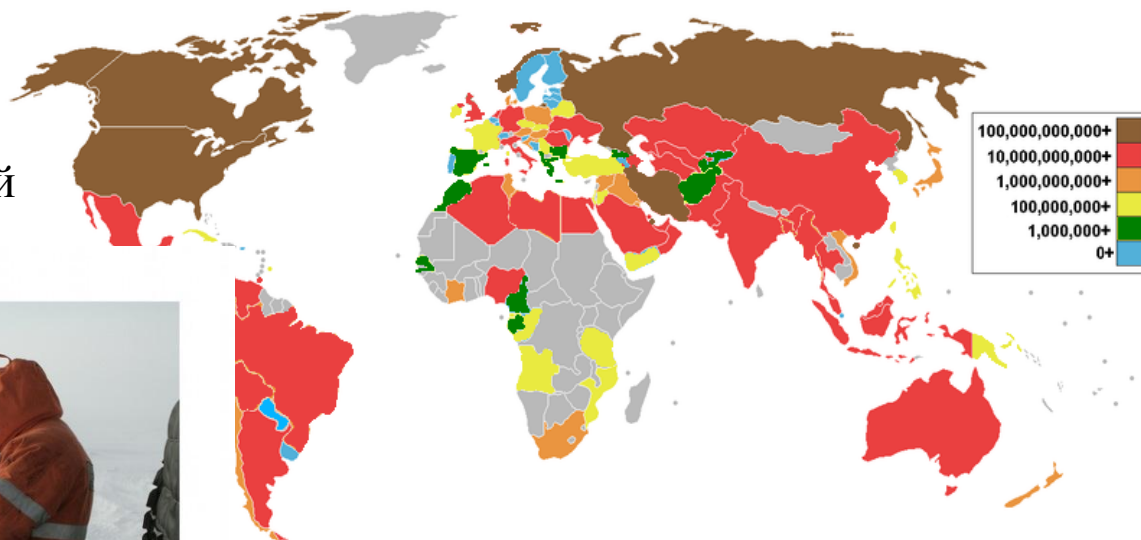


Проект совместно с Южно-российским университетом экономики и сервиса, ITP GmbH (Gesellschaft für Intelligente Textile Produkte), BVN Engineering

Мотивация

Большая часть газовых месторождений находится в зоне тяжелых климатических условий

Распределение запасов природного газа в мире



Сотрудники нефтегазовых компаний вынуждены работать

- При экстремально низких температурах
- В условиях сильного ветра



Цель проекта – создание математической модели для проектирования специальной защитной одежды

Проект в начальной фазе

Уже проведены расчёты упрощённой модели человеческого тела.

Использован решатель **pisFoam 2.1+** уравнения переноса температуры (пасс.)

Первые результаты: достигнуто хорошее соответствие с экспериментальными данными по коэффициенту теплоотдачи с обнаженного корпуса (см. рис. ниже).

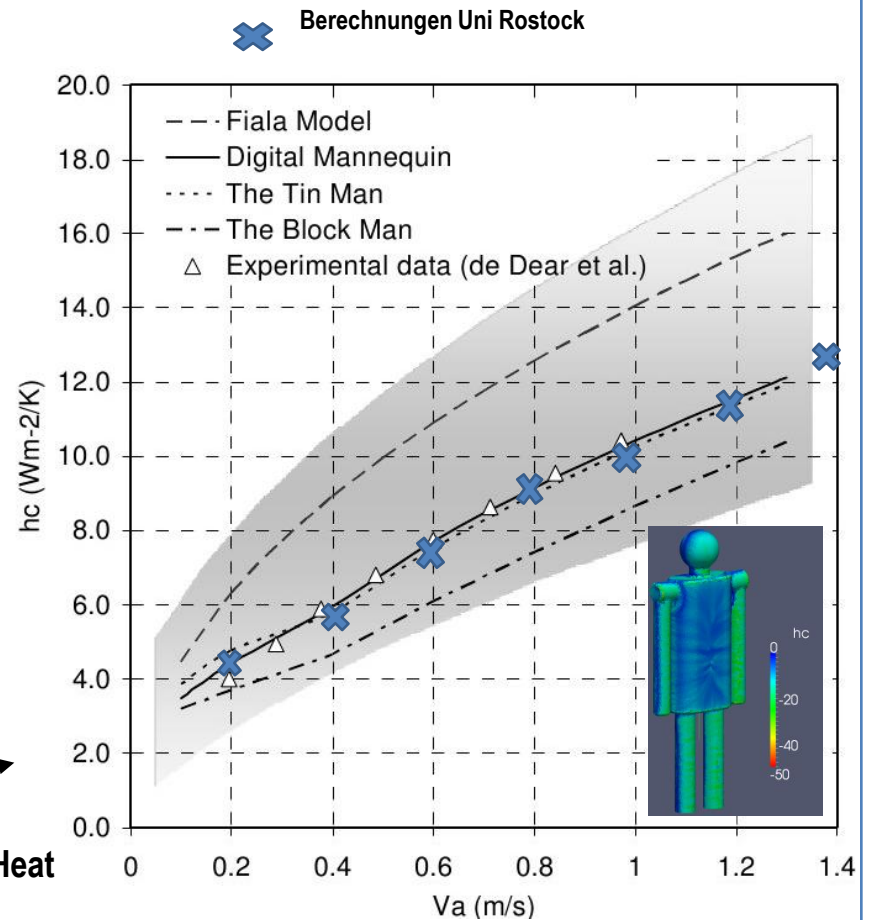
В н.в. проводятся следующие работы:

- расчет теплоотдачи с корпуса в одежде с целью изучения влияние загрязнения спецодежды на ее теплозащитные свойства

- разработка трехмерной модели теплопроводности взамен одномерной модели Fiala

- комбинирование термоаэродинамической внешней и термодинамической внутренней задач

Источник: Zhang et al. „Human Environmental Heat Transfer Simulation With CFD“



Большое спасибо за внимание !

