



КРЫЛОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР

Прогресс в использовании суперкомпьютерных технологий в судостроении

Лобачев М.П., Таранов А.Е.

Суперкомпьютерные дни
в России, 2018, Москва

Ситуация с использованием численных методов в судостроении

Судостроение – одна из самых консервативных отраслей промышленности в части использования методов математического моделирования и суперкомпьютерных технологий.

Объем **мировых** продаж программного обеспечения в судостроении в 10 – 14 раз меньше, чем в автомобильной промышленности, авиа и ракетостроении. С учетом САД систем, даже по сравнению с легкой промышленностью.

При этом требования к точности расчета ряда параметров существенно выше, чем в других отраслях. Требования по погрешности расчета трения в корабельной гидродинамике (Крыловский ГИИ) – 3 %, в ракетостроении (АО «ГРЦ Макеева») – 10-12 %. Это создает большие проблемы при использовании ПО для инженерного анализа. Разработчики ПО не желают удовлетворять таким жестким требованиям.

Однако численные методы за последние годы занимают все более прочное место в судостроении. Круг задач, решаемых с использованием методов математического моделирования, существенно расширился.

Качественный сдвиг в этом процессе произошел с развитием высокопроизводительных вычислений. Компьютерные и экспериментальные методы становятся равно необходимыми инструментами в обеспечении проектирования.

Хотя в судостроении в целом приоритет остается за экспериментальными методами, особенно в области гидродинамики и динамики объектов морской техники.

Факторы, способствующие росту использования численных методов

Рост требований Заказчика.

- Со стороны гражданского заказчика ужесточение требований по безопасности, экономичности и экологичности (как по отношению к экипажу, так и по отношению к внешней среде)
- Со стороны военных – ужесточение требований по достижимым характеристикам.

Совершенствование вычислительных технологий.

- Совершенствование численных методов, включая как развитие моделей физических процессов (описание ламинарно-турбулентного перехода и т.п.) так и методов решения систем алгебраических уравнений к которым сводятся все задачи.
- Развитие «сопутствующих» технологий. Например, таких как построение расчетных сеток. Автоматизация построения сеток и возможность распараллеливания процесса построения сеток.
- Совершенствование всех компонент ЭВМ (увеличение тактовой частоты процессоров, увеличение числа каналов памяти внутри процессоров, числа ядер в процессорах, частоты шин памяти и скорости работы сетей).

В конечном итоге переход на **суперкомпьютерные технологии, т.е. технологии вычислений с массивным распараллеливанием.**

Потребности в машинных ресурсах для численных методов в судостроении

Механика деформируемого твердого тела (прочность).

Сейчас: рабочие станции, машины с общей памятью (SMP), кластерные системы небольшой производительности, «мини суперЭВМ».

В будущем: редко суперкомпьютеры.

Именно в этой области наибольший прогресс в использовании численных методов. Только в этой сфере можно говорить о том, что в судостроении эксперимент по сравнению с расчетами оказался на втором плане.

Акустика.

Сейчас: рабочие станции (4-процессорные машины).

В будущем: суперкомпьютеры.

Электродинамика.

Сейчас: кластерные системы небольшой производительности, SMP машины с общей памятью до 1 Тбайта, редко – суперкомпьютеры.

В будущем: суперкомпьютеры.

Гидродинамика.

Сейчас: суперкомпьютеры 20-50 Тфлопс.

В ближайшее время для научных расчетов: суперкомпьютеры 250-350 Тфлопс,

В будущем: периодически суперкомпьютеры 1-10 Петафлопс.

Факторы, сдерживающие активный рост использования численных методов в корабельной гидродинамике

5

- Относительно дешёвый и точный эксперимент в судостроении.
- Весьма сложный характер течений вокруг объектов реальной геометрии. Разномасштабность особенностей течения.
- Эллиптический характер уравнений Рейнольдса, что приводит к необходимости весьма больших ресурсов как по памяти ЭВМ, так и требуемому процессорному времени при их решении.
- Высокие числа Рейнольдса: $Re=10^7$ – модель; $Re=10^9$ – натура (корпус судна), что определяет большую размерность расчетных сеток и ряд специфических требований к ним.
- Сроки выполнения расчетов на современных ЭВМ при решении ряда задач оказываются больше, чем сроки проведения экспериментов даже с учетом дополнительного времени для изготовления модели для проведения эксперимента.
- Для ряда задач стоимость выполнения расчетов существенно превышает стоимость проведения экспериментов. Поэтому часто численные методы используются в так называемом научном проектировании, когда отрабатываются мероприятия по достижению требуемых Заказчиком характеристик объектов морской техники. При реальном проектировании используются полученные ранее разработки (как на основе экспериментов, так и на основе расчетов).

Основные сферы применения методов численной гидродинамики⁶

- **Предварительная отработка геометрической формы объектов морской техники (МТ)**, т.е. расчеты с вариацией формы с целью получения либо наилучших, либо заданных гидродинамических характеристик. С дальнейшим изготовлением модели и проведением её испытаний. На оптимизационные расчеты выходим только сейчас. Причем одним из основных препятствия широкого использования оптимизационных расчетов является сложность параметризации геометрии.
- **Проведение расчетов характеристик, которые невозможно получить в ходе эксперимента или эксперимент практически невозможен.** В настоящее время это **наиболее представительная группа задач**, для решения которых привлекаются численные методы и суперкомпьютерные технологии.
- **Оценка «масштабного эффекта»**, т.е. сопоставительные расчеты для условий проведения модельного эксперимента и натуральных условий. В первую очередь для случаев, когда не существует инженерных методик пересчета результатов эксперимента на натурные условия.
- **Численное моделирование, полностью заменяющее физический эксперимент.** В настоящее время это весьма редкая ситуация. В основном когда допустимы погрешности 10-20%.

Основные области использования суперкомпьютерных технологий в корабельной гидродинамике

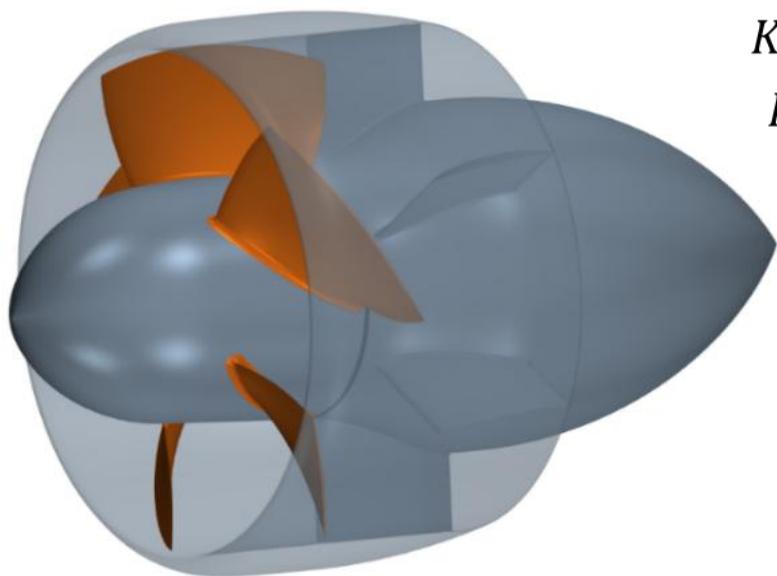
- В настоящее время при решении задач корабельной гидродинамики наметилась тенденция все большего использования современных численных методов на основе **суперкомпьютерных технологий**. При этом идет не замещение экспериментальных исследований численным экспериментом, а **дополнение эксперимента расчетом**.
- Основное преимущество численного эксперимента: получение существенно большего объема информации о моделируемых явлениях, чем это возможно при проведении физического эксперимента. На первый план выходит **анализ локальных особенностей течения и развитие их во времени**, а не только получение информации об интегральных характеристиках объекта.
- Весьма важным оказывается изучение **влияния локальных особенностей геометрии объектов на локальные характеристики**.
- Однако решение многих наиболее актуальных задач **требует существенно больших вычислительных ресурсов**, чем используемые (доступные) в настоящее время. В частности из-за высокой стоимости расчетов.

Предварительная отработка формы объекта МТ

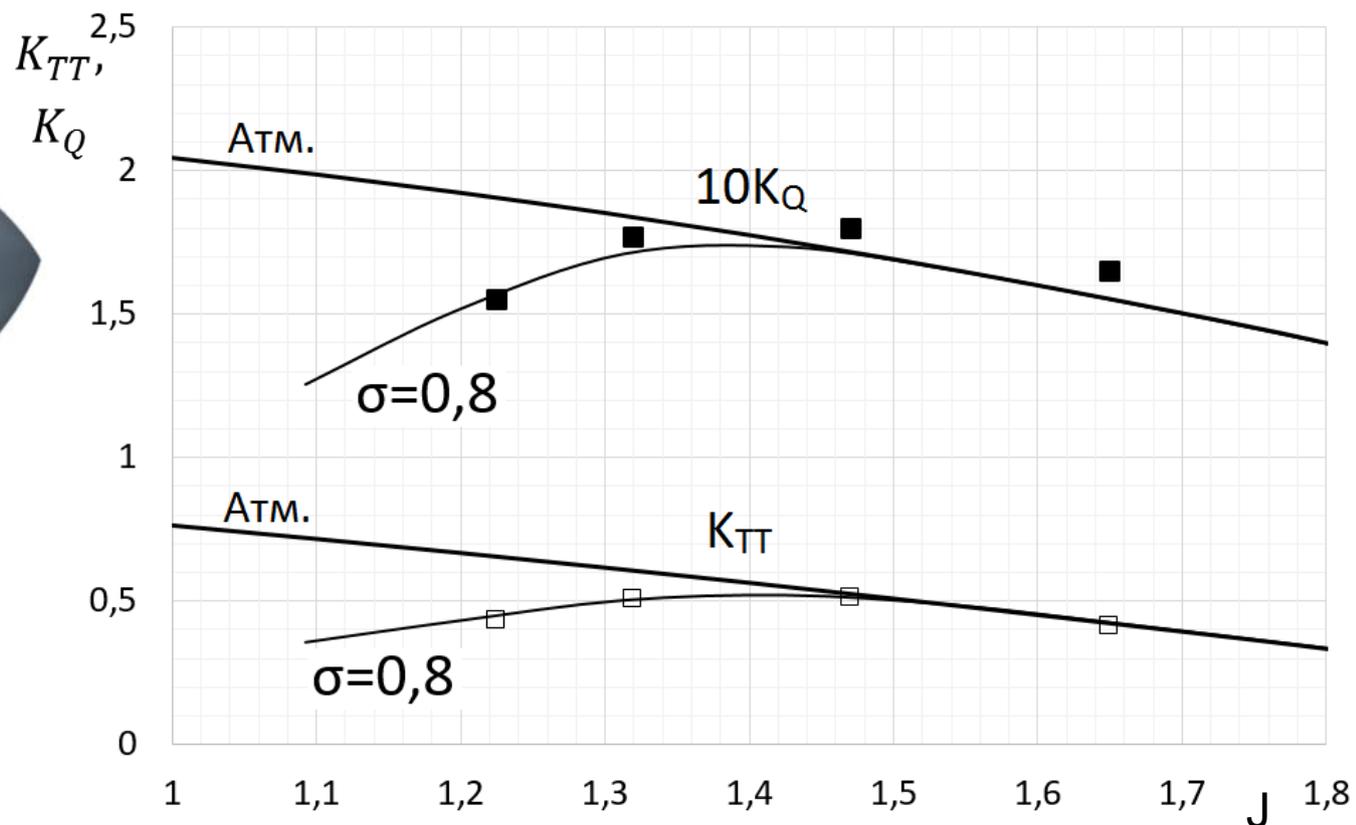
ВОДОМЕТНЫЙ ДВИЖИТЕЛЬ НАСОСНОГО ТИПА С КОРОТКИМ ВОДОВОДОМ
ОТРАБОТКА ФОРМЫ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ КАВИТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Патент на изобретение РФ
№ 2537351 от 07.05.2013 г.

$$K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4}, \quad K_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D^5}, \quad J = \frac{u}{nD}, \quad \sigma = \frac{P - P_V}{0.5 \rho u^2}$$

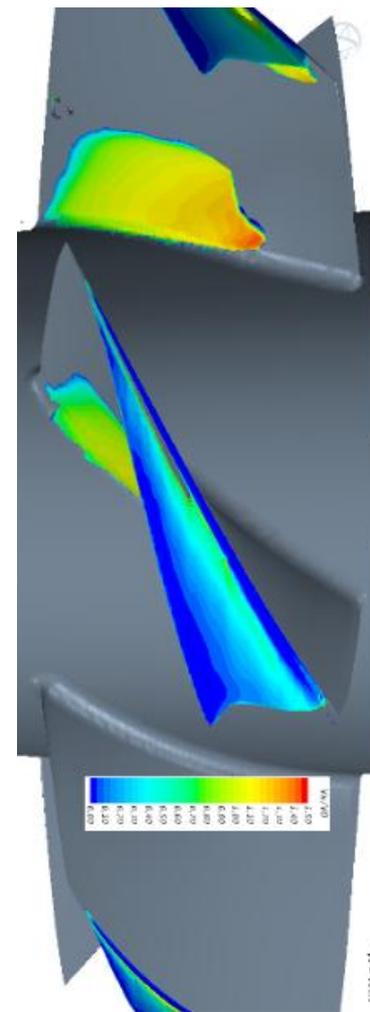
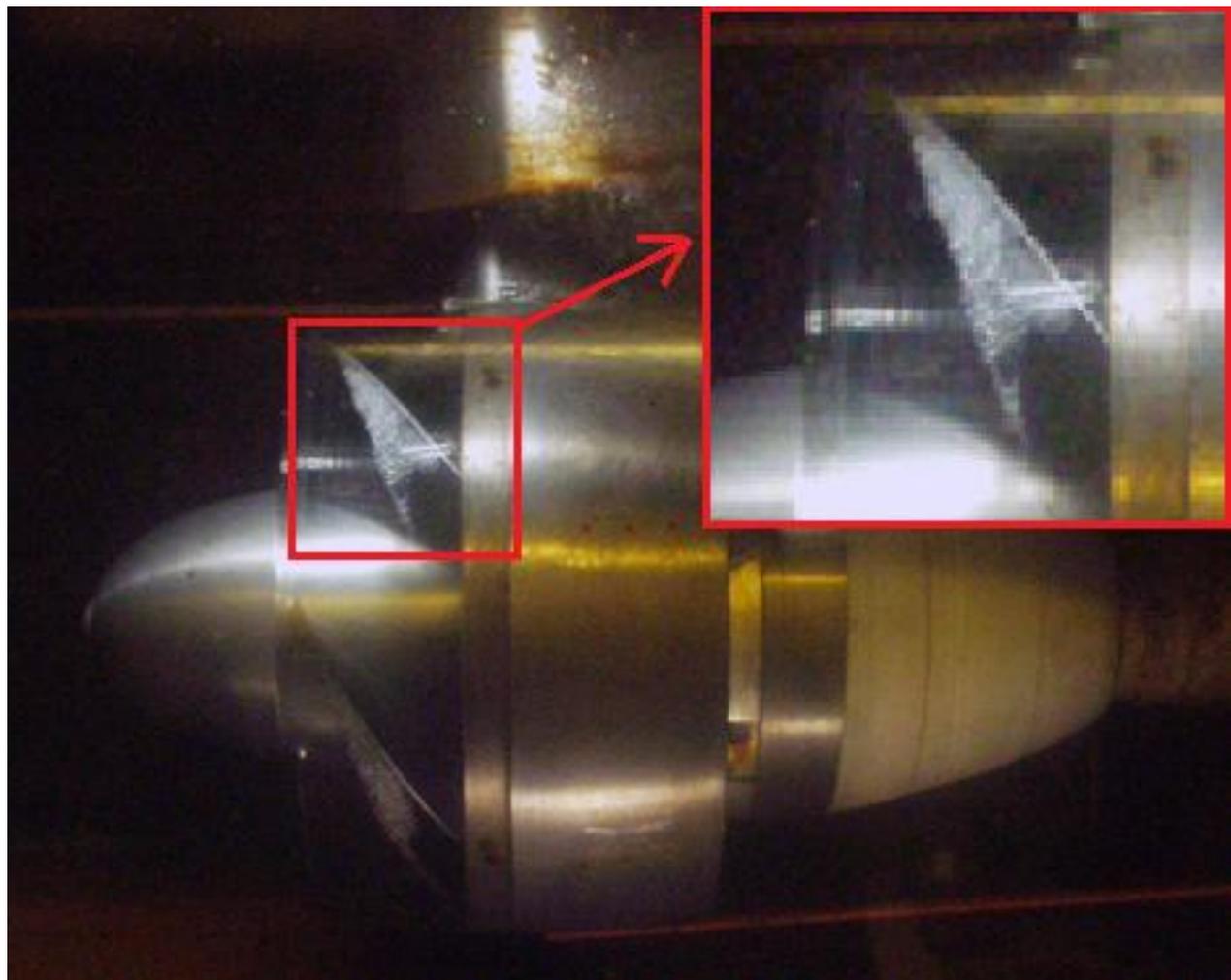


Расчетная сетка: 35 млн. ячеек



Гидродинамические характеристики водомета. Линии – эксперимент,
символы – расчет при числе кавитации $\sigma=0,8$

Предварительная отработка формы объекта МТ

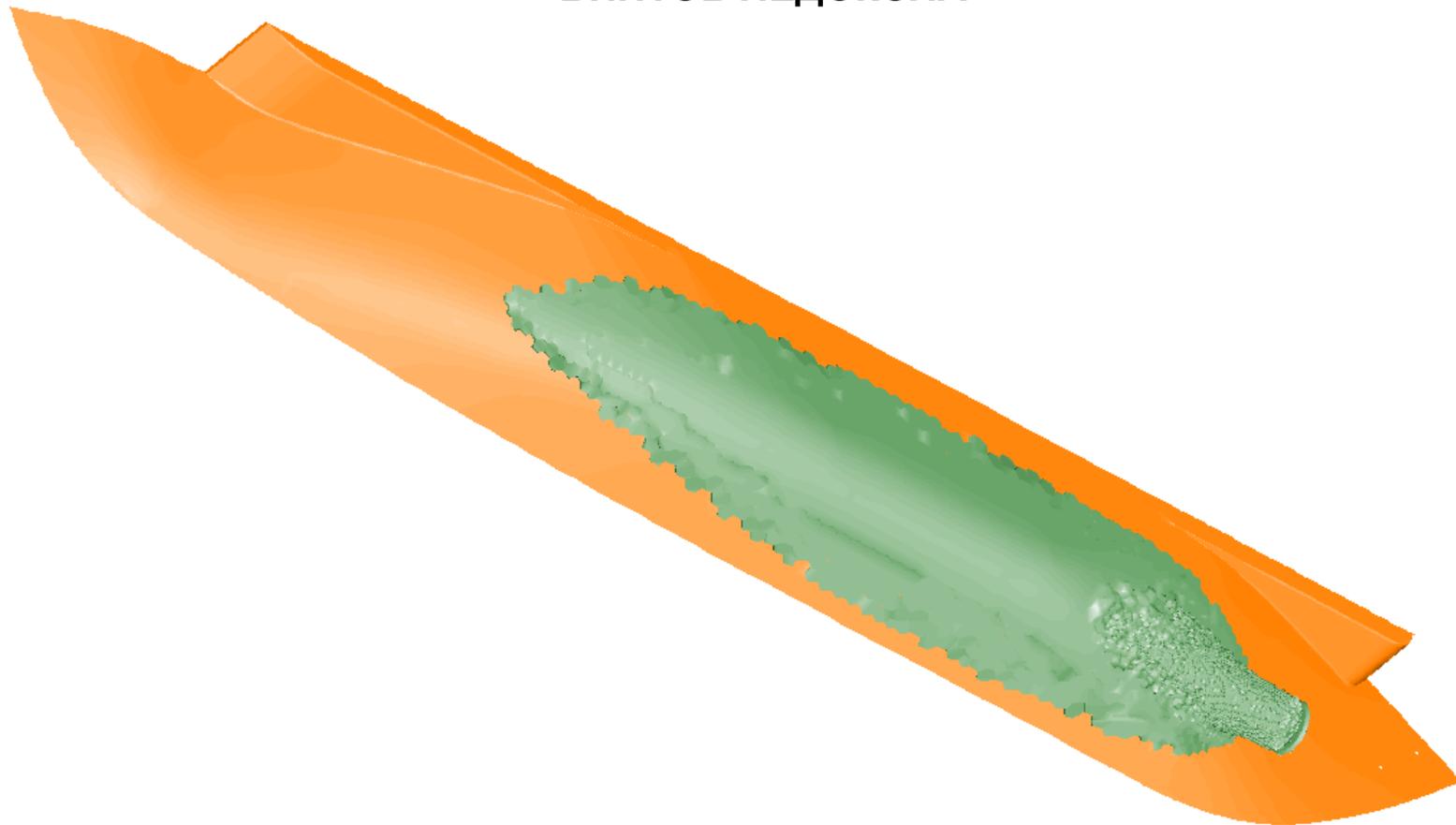


Сравнение зон кавитации в районе концевго сечения лопасти. Слева фотосъемка в кавитационной трубе, справа визуализация паровой фазы в численном моделировании. Поступь $J=1,5$, число кавитации $\sigma=0,8$

Исследовалось влияние геометрии законцовок лопаток на кавитационные характеристики

Характеристики, которые практически невозможно получить в ходе эксперимента + расчеты для натуры

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГИДРООБМЫВА ЗА СЧЕТ НОСОВЫХ ГРЕБНЫХ ВИНТОВ ЛЕДОКОЛА

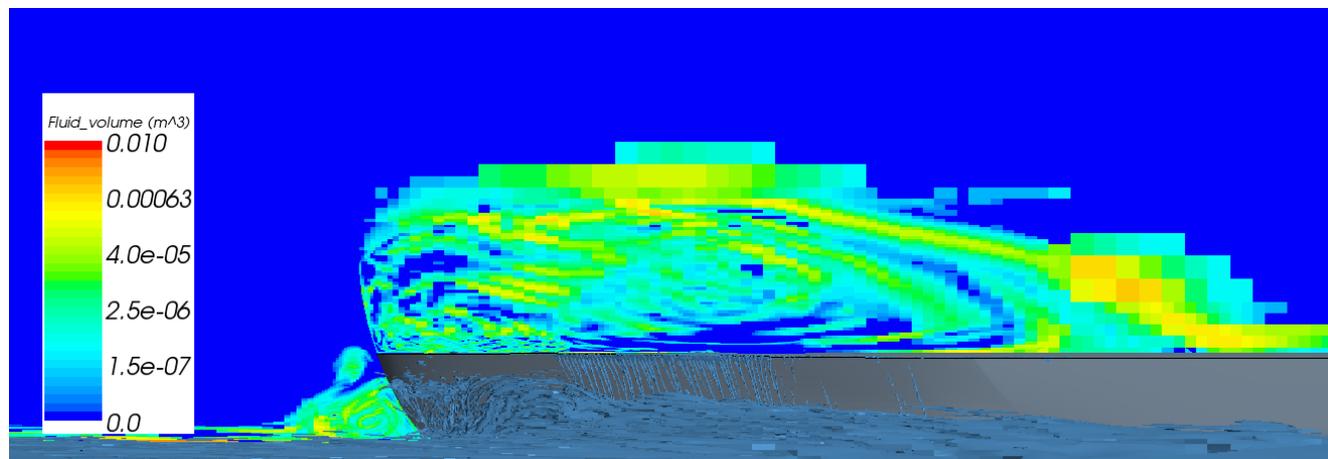
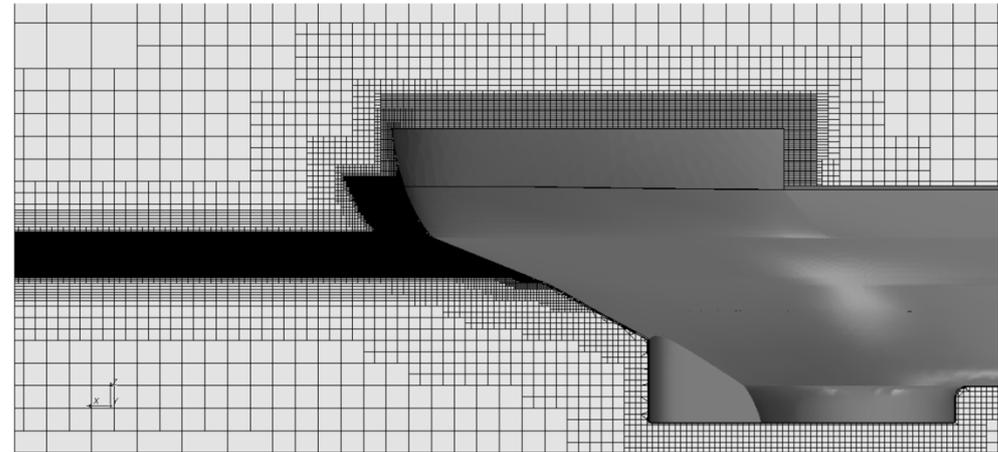
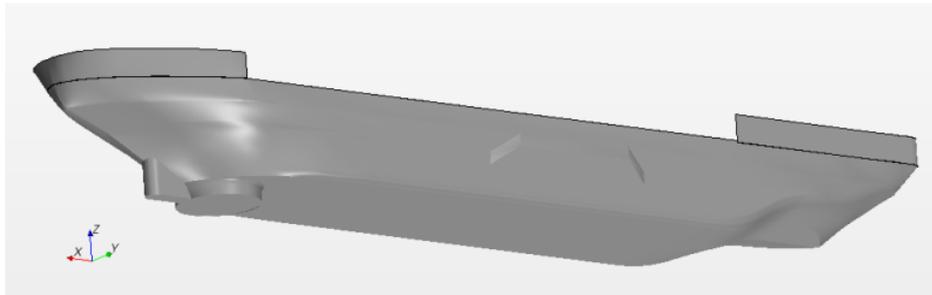


Распределение по пространству объемов, в которых скорость в струе от носового винта достаточна для смыва льда. Вид на корпус ледокола снизу.

Характеристики, которые невозможно получить в ходе эксперимента + расчеты для натуры

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАЛИВАЕМОСТИ И БРЫЗГООБРАЗОВАНИЯ В НОСОВОЙ ОКОНЕЧНОСТИ ТУРЕЛЬНОГО СУДНА

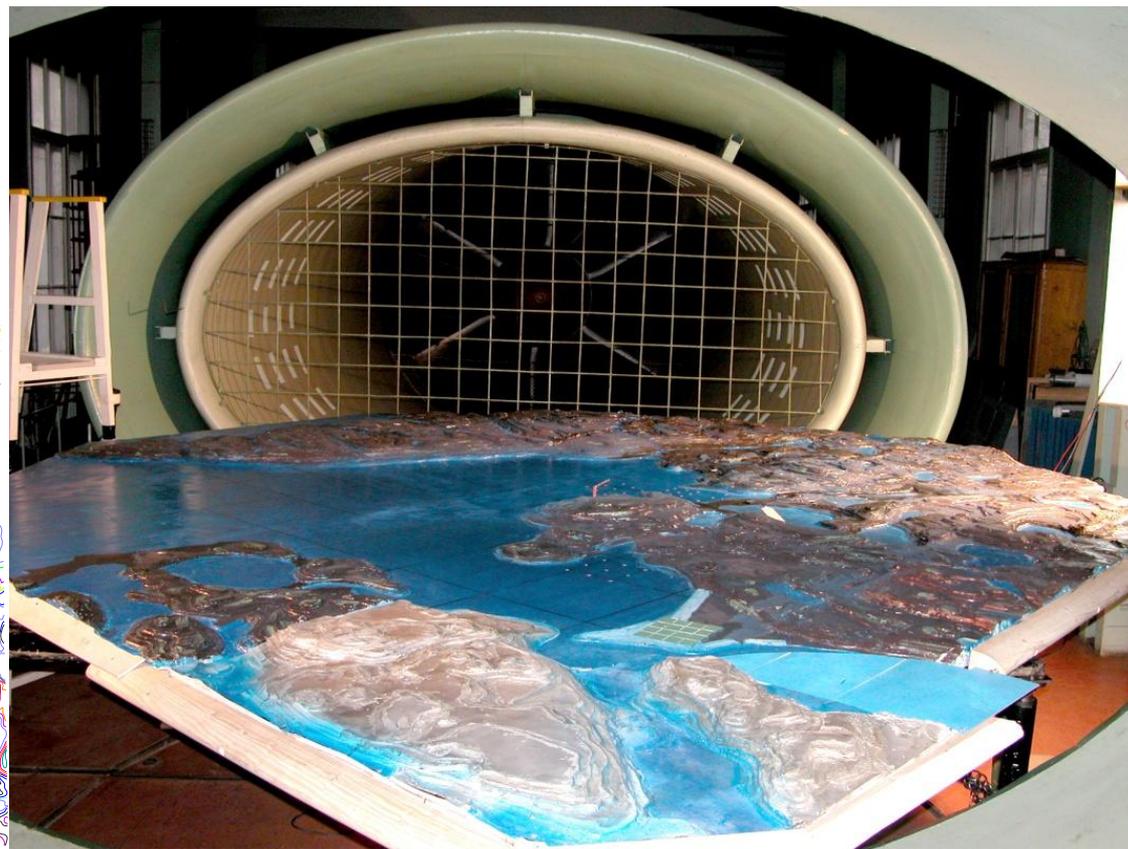
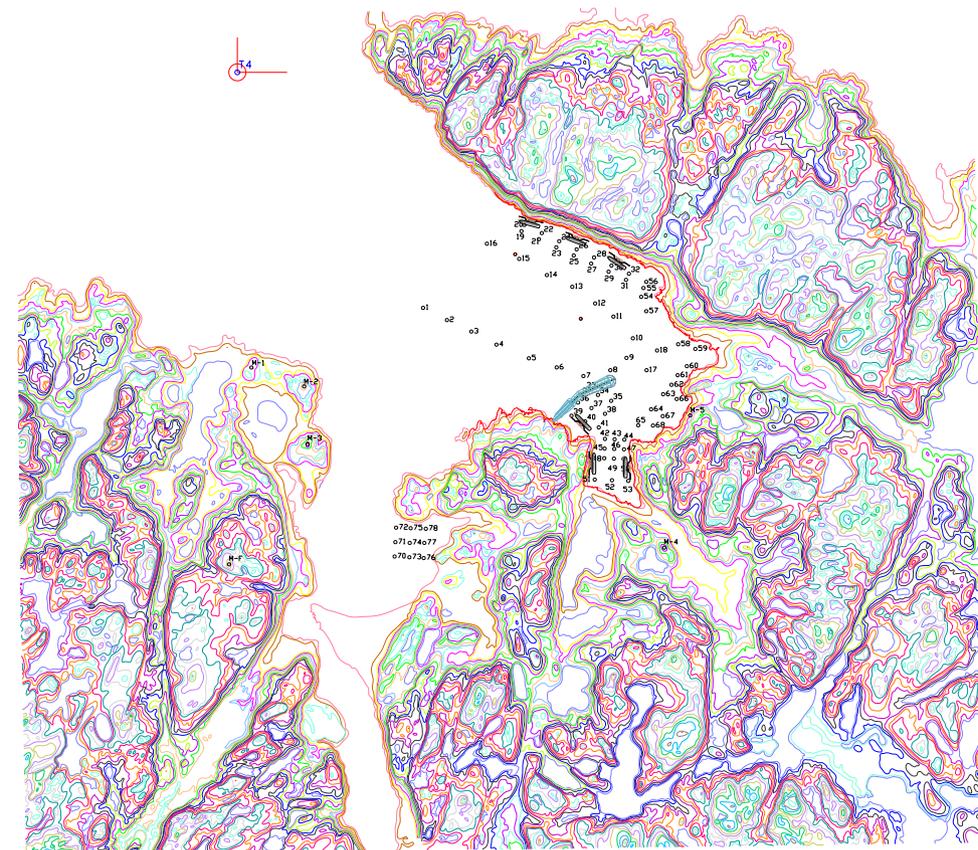
Размер сетки: 29 млн. ячеек



Мгновенное распределение объемов воды в ячейках диаметральной плоскости

Оценка «масштабного эффекта»

ТЕРИБЕРСКАЯ ГУБА, КОЛЬСКИЙ ПОЛУОСТРОВ

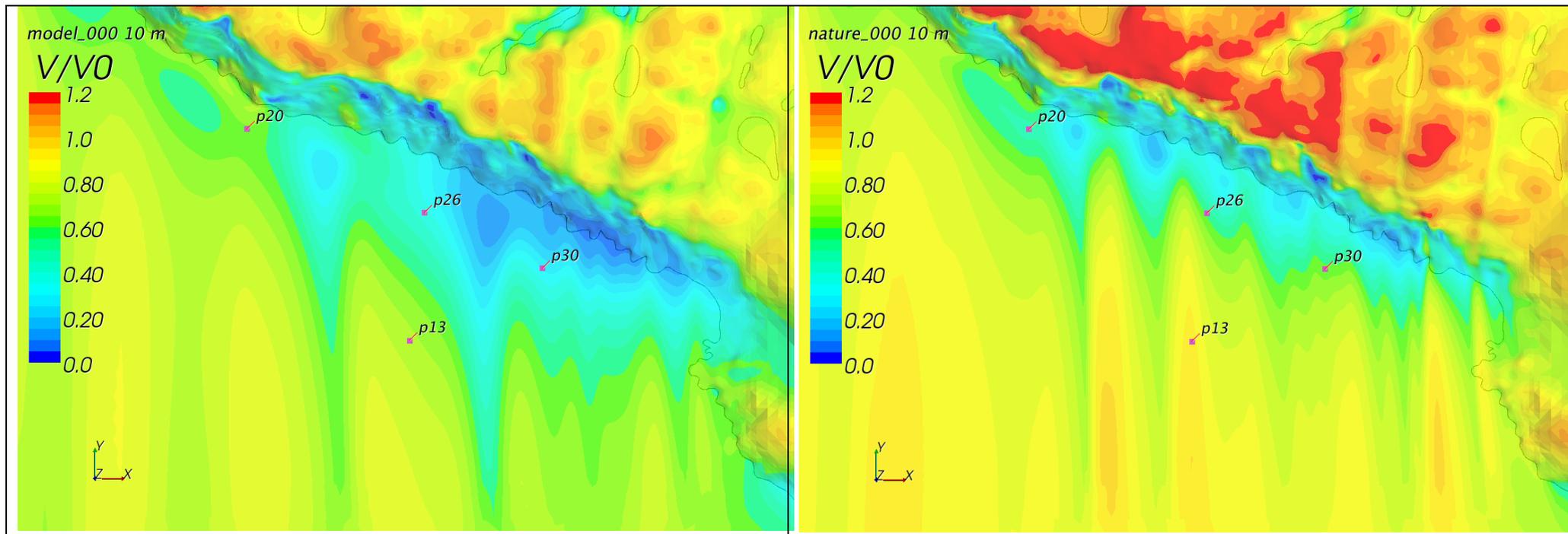


**Общий вид зоны счета
с изолиниями высот
и контрольными точками**

Модель рельефа в аэродинамической трубе

Оценка «масштабного эффекта»

ТЕРИБЕРСКАЯ ГУБА. ИЗОЛИНИИ СКОРОСТИ ВЕТРА НА ВЫСОТЕ 10 М ОТ ПОВЕРХНОСТИ.
СЕВЕРНЫЙ БЕРЕГ. РАСЧЕТ.



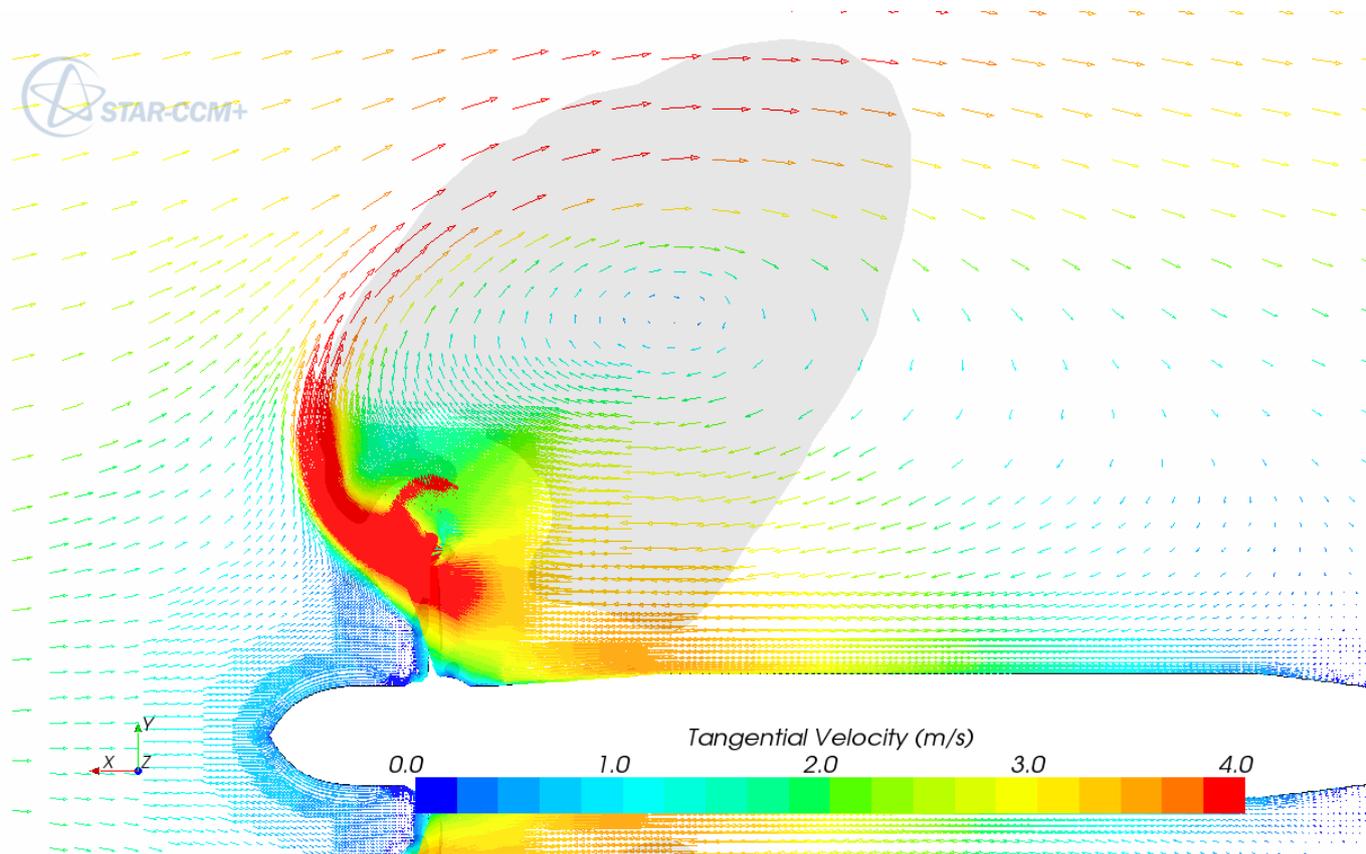
Модель

Натура

Зона подторможенного потока для натуральных условий существенно уже

Численное моделирование, полностью заменяющее физический эксперимент

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРУТЯЩИХ МОМЕНТОВ ОТНОСИТЕЛЬНО ОСИ ПОВОРОТА ЛОПАСТИ ВИНТОВ РЕГУЛИРУЕМОГО ШАГА (ВРШ) ПРИ ИХ ПЕРЕКЛАДКЕ



Поле скорости в вертикальном сечении, проходящем через ось винта.
Серым цветом показана область преобладания вихревого движения.
 $\Psi = -45^\circ$, $J = 0.8$.

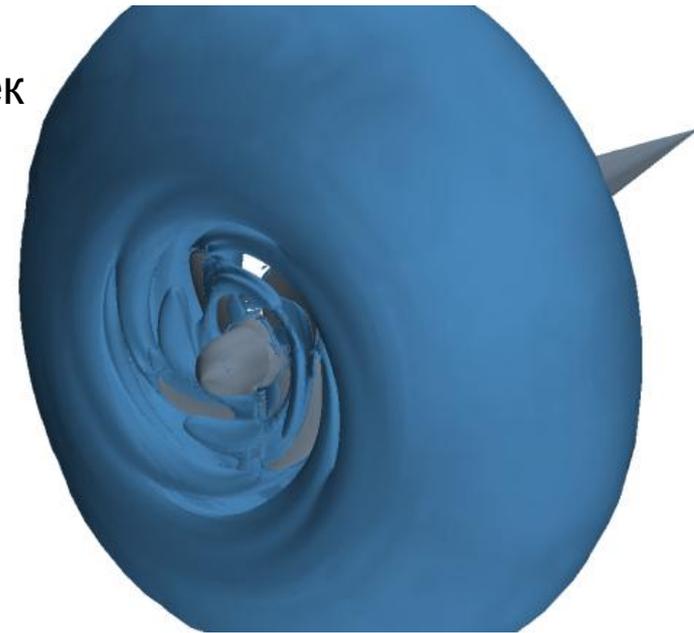
Численное моделирование, полностью заменяющее физический эксперимент

ВИХРЕВЫЕ СИСТЕМЫ ВРШ ПРИ ПЕРЕКЛАДКЕ ЛОПАСТИ. ИЗОПОВЕРХНОСТЬ Q-КРИТЕРИЯ ($Q = 100 \text{ сек}^{-2}$).

7 млн. ячеек



38 млн. ячеек



$J = 0.8, \Psi = 0^\circ$

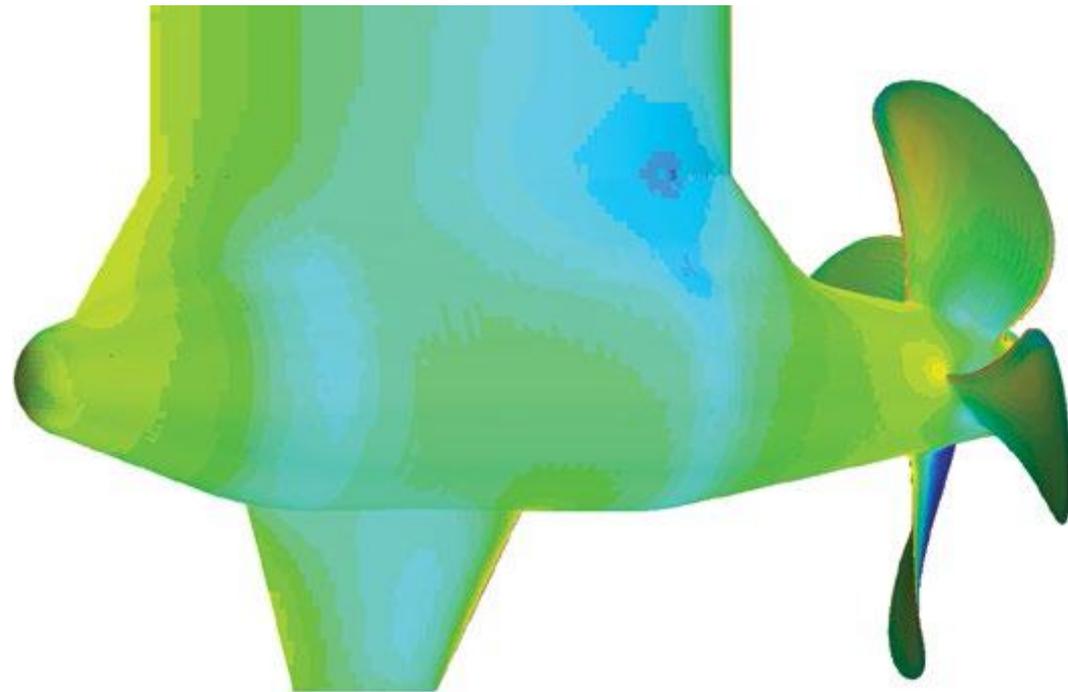
$J = 0.8, \Psi = -45^\circ$

Расхождение между расчетом и экспериментов не превосходит 15% от максимального значения скручивающего момента.

В области наибольших моментов, т.е. на поступях близких к швартовому режиму и при угле разворота лопасти $\Psi = -45^\circ$ результаты расчета и эксперимента совпадают с точностью 5-7%.

Характеристики, которые невозможно получить в ходе эксперимента + расчеты для натуры

Определение для натуральных условий распределения давления по поверхности винто-рулевой колонки и сил на ее отдельных частях



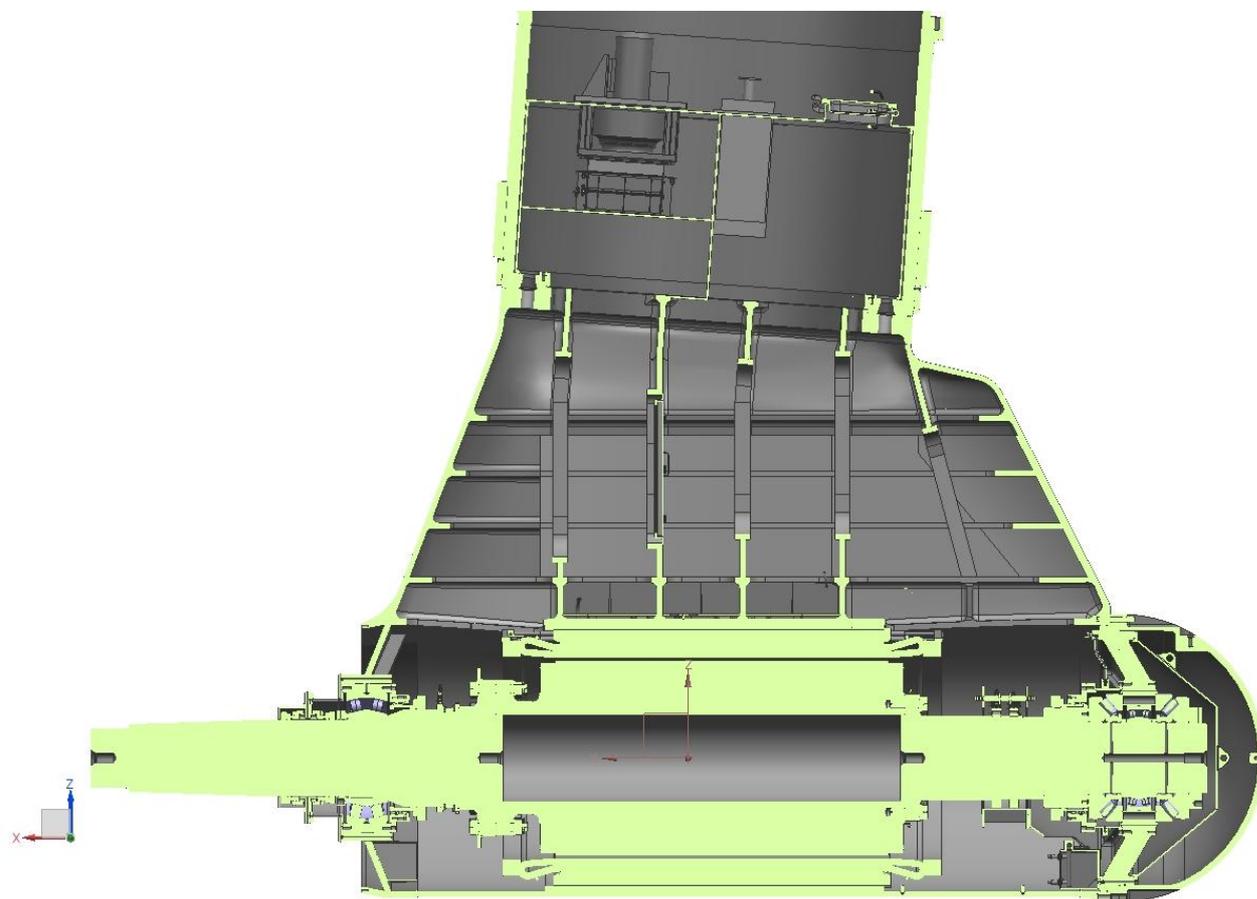
Размер сетки 10-30 млн.

“ABB has used successfully Krylov Centre CFD calculation capacity in its R&D Projects where Azipod product performance and loads have been investigated. This cooperation between ABB and Krylov Centre has been productive and very useful in our product development. ABB has been very satisfied about the results obtained”.
Tomi Veikonheimo, manager hydrodynamics, ABB.

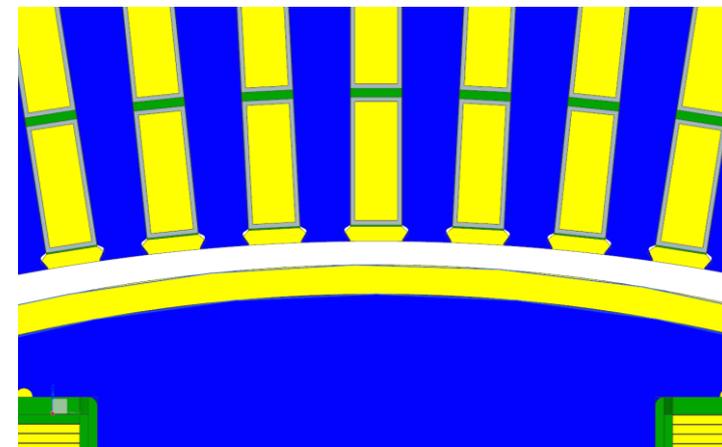
«Фирма АВВ успешно использовала вычислительные ресурсы Крыловского центра при выполнении НИОКР, в ходе которых исследовались гидродинамические характеристики и нагрузки на винторулевые колонки АВВ. Это сотрудничество между фирмой АВВ и Крыловским центром оказалось очень продуктивным и полезным для разработки нашей продукции. Фирма АВВ довольна полученными результатами», – Томи Вейконхеймо, менеджер по гидродинамике, компания АВВ.

Принципиально невозможно провести модельный эксперимент

Расчет сопряженного теплообмена внутри винто-рулевой колонки



Размер сетки 280 млн. ячеек



Материалы в статоре

Желтый - медь

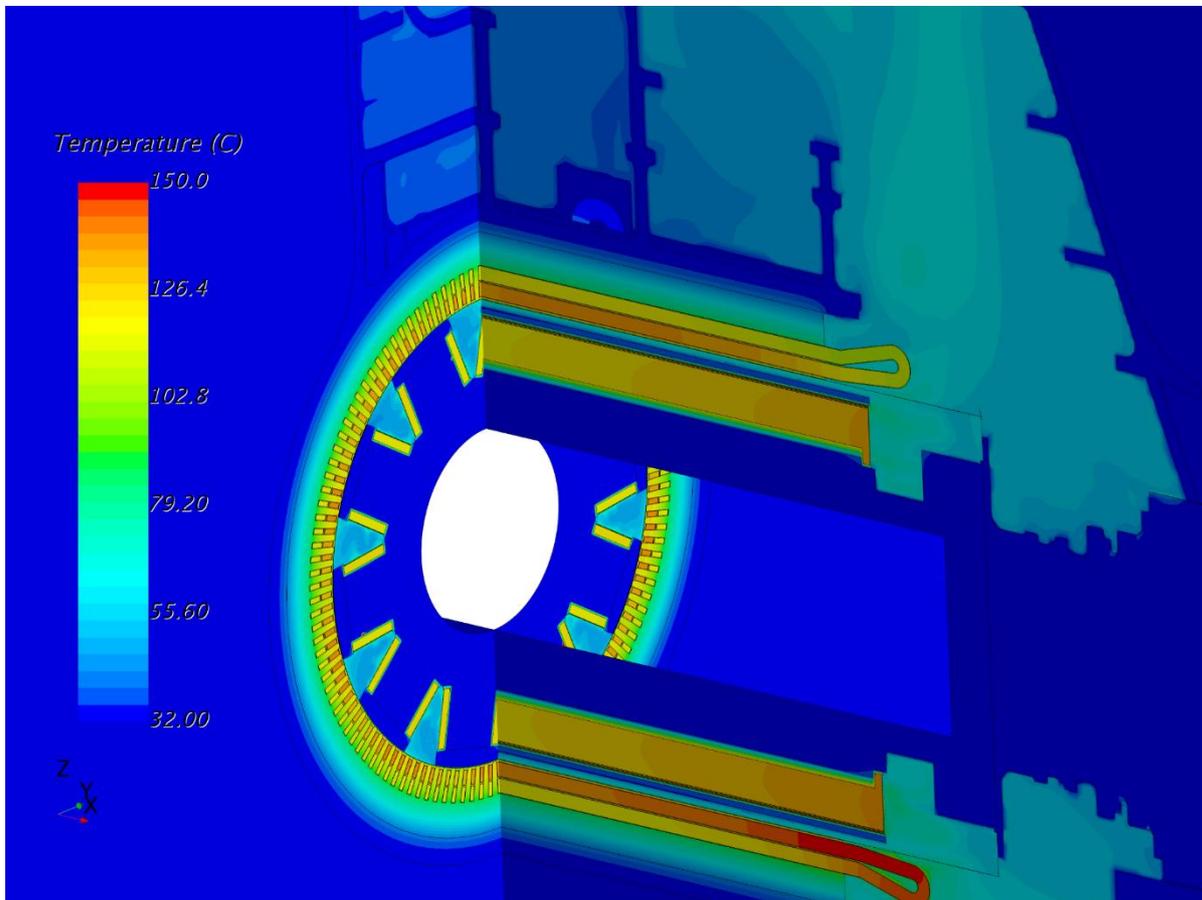
Синий - сталь

Зеленый -
стеклотекстолит

Серый -
изоляция

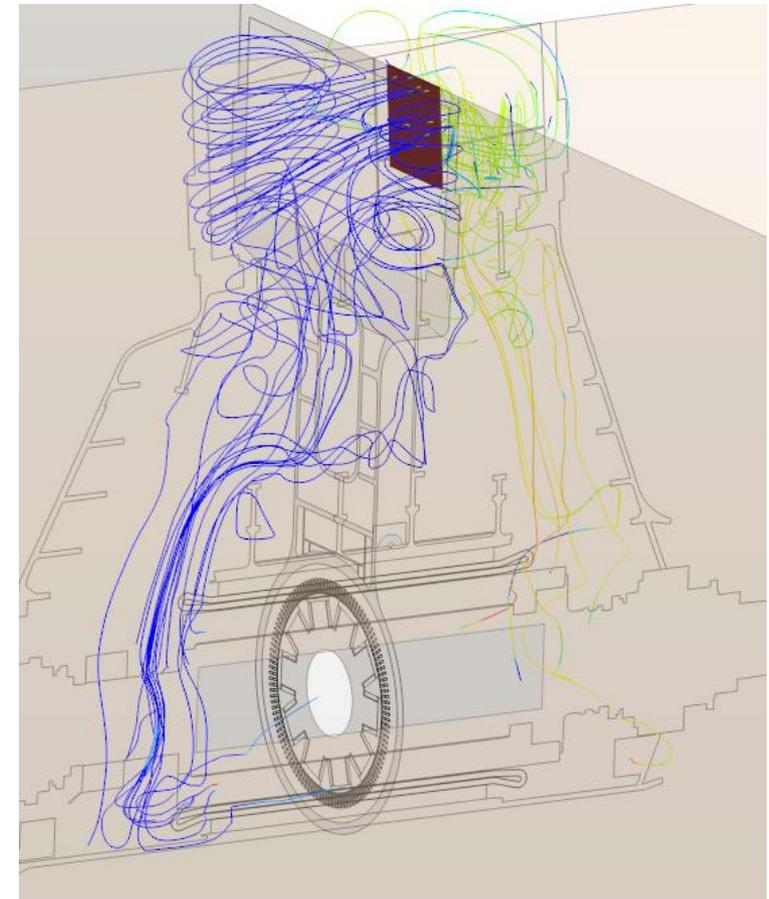
Принципиально невозможно провести модельный эксперимент

Расчет сопряженного теплообмена внутри винто-рулевой колонки



Распределение температур в элементах статора, ротора и в окружающем пространстве

Размер сетки 280 млн. ячеек



Линии тока во внутреннем пространстве колонки

Моделирование в судостроительной науке

до 2005 г.

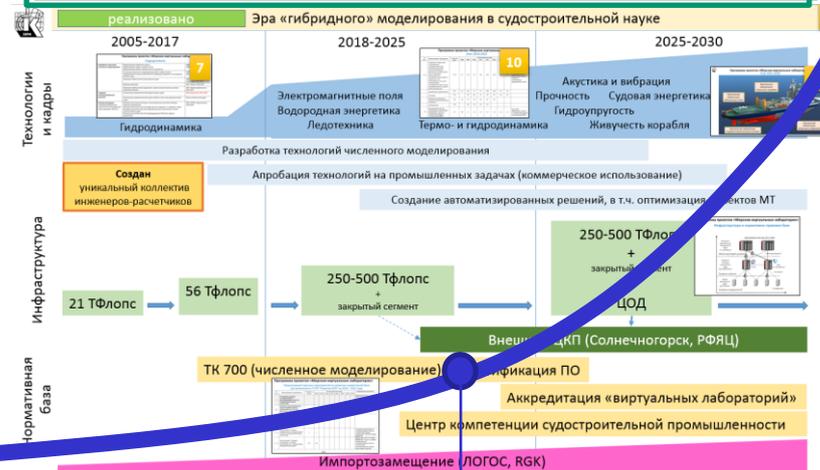
95%
физического
моделирования

Физическое моделирование

- Физические прототипы
- Физические модельные и натурные экспериментальные исследования
- Накопленная база данных результатов работ экспериментальной базы
- Зарубежное коммерческое ПО

2005-2030 гг.

«Гибридное» моделирование



Суперкомпьютерное моделирование
ДОРОЖЕ → ДЕШЕВЛЕ
Физического эксперимента

2030 г. и далее

Математическое
моделирование

Виртуальные прототипы

- Численные модельные и натурные экспериментальные исследования
- Отечественное ПО
- База знаний
- Машинное обучение

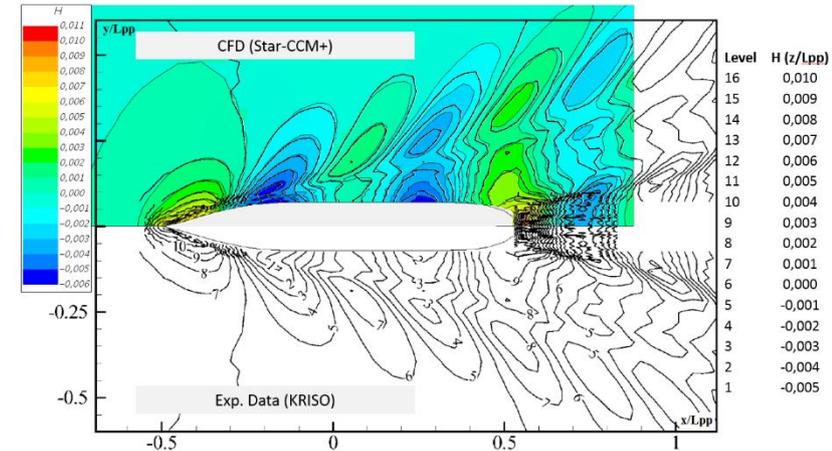
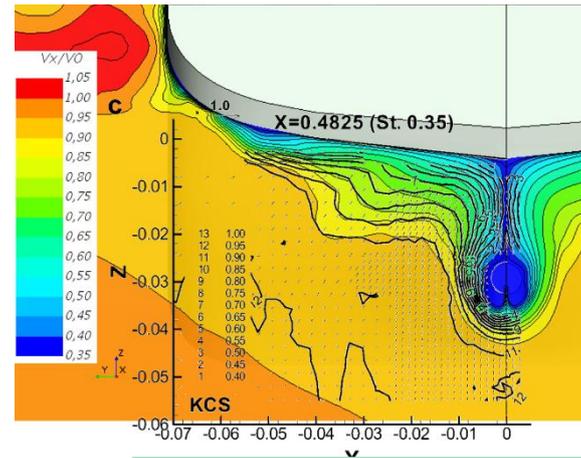
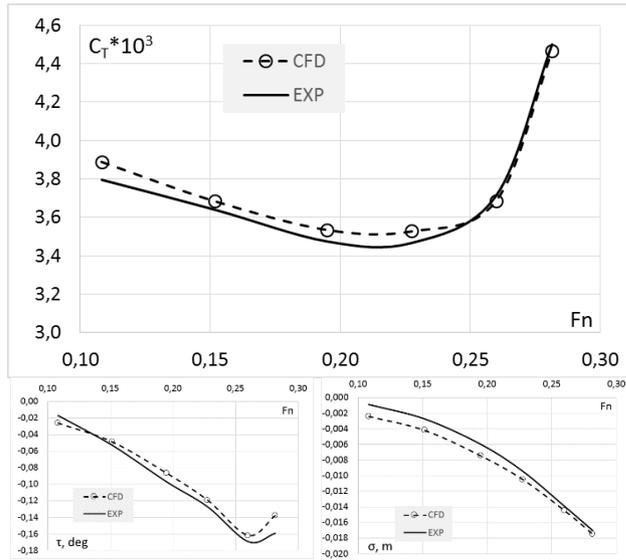
80%
численного
моделирования

95 / 5 %

Физический эксперимент / математическое моделирование

20 / 80 %

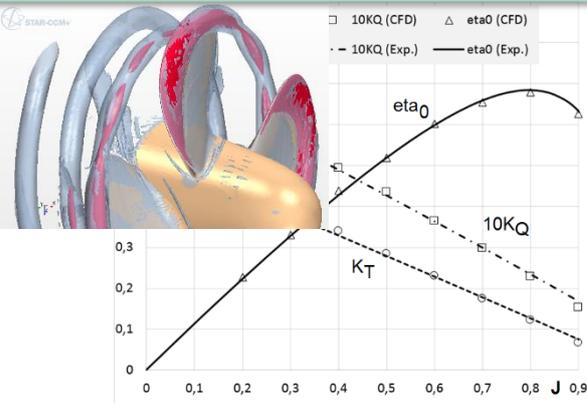
Комплексное исследование объекта морской техники в цифровом бассейне



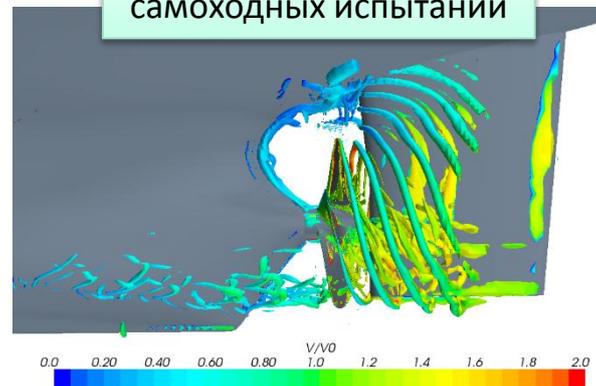
Моделирование буксировочных испытаний
Определение интегральных и локальных характеристик



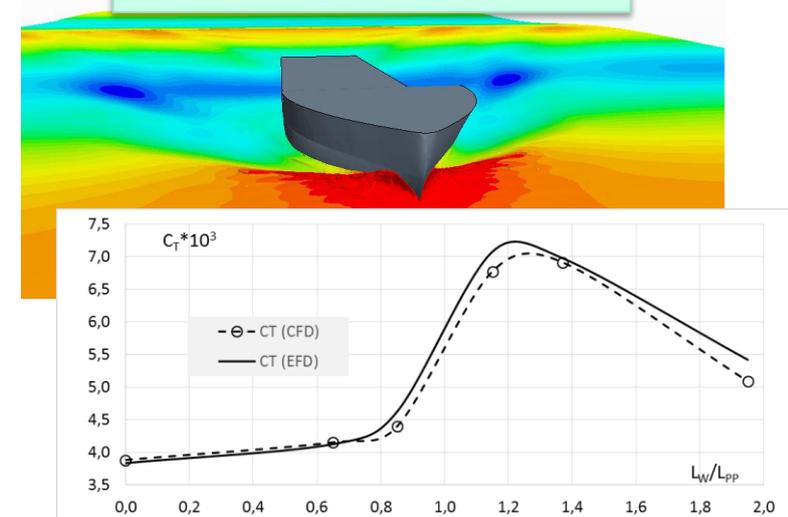
Определение гидродинамических и кавитационных характеристик движителей



Моделирование самоходных испытаний



Динамика судна на волнении

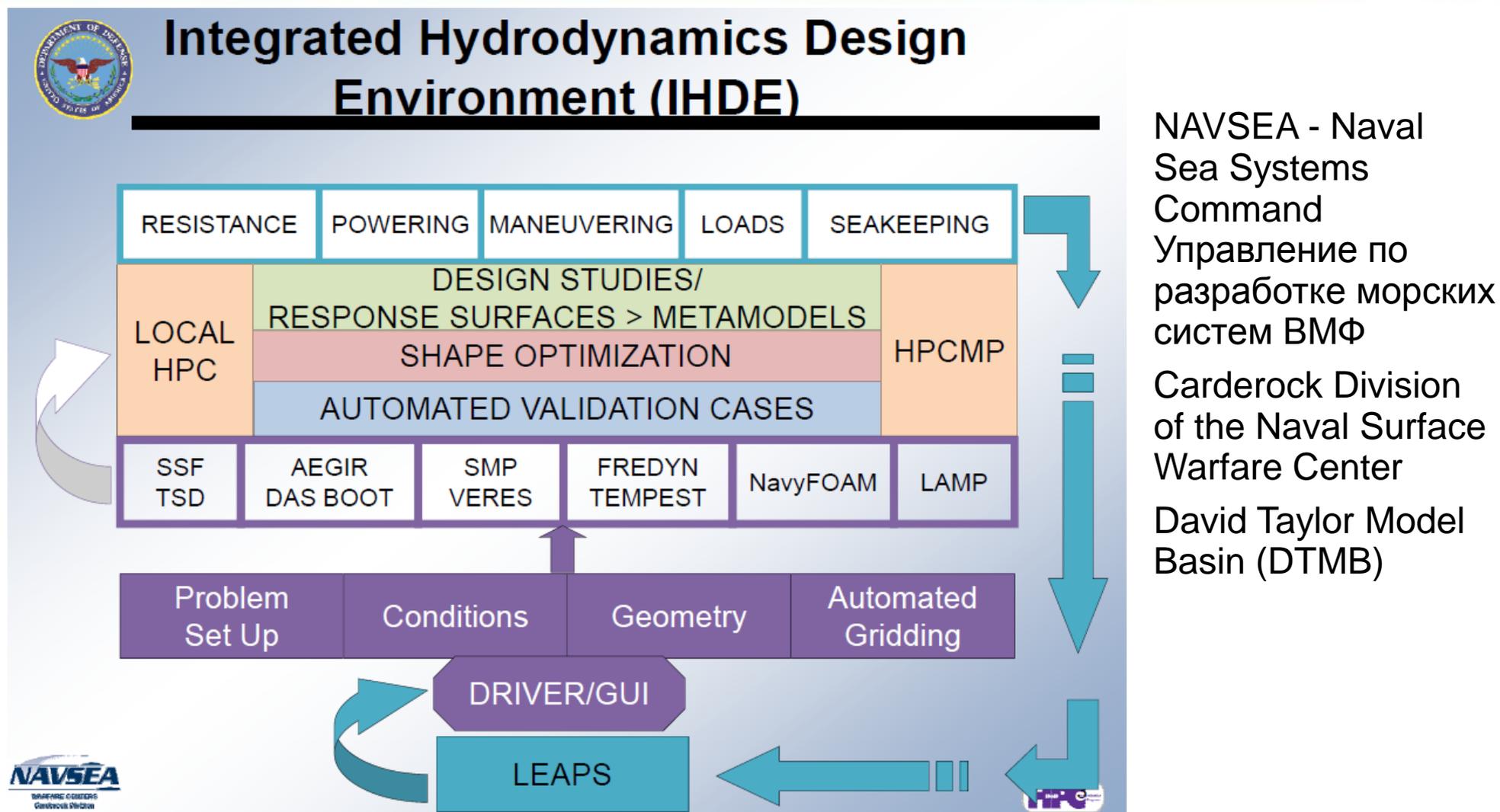


Программа проектов «Цифровой научный центр судостроения»

«Виртуальная лаборатория «Теория корабля»



Интегрированная среда разработки, бассейн Давида Тейлора (DTMB), США

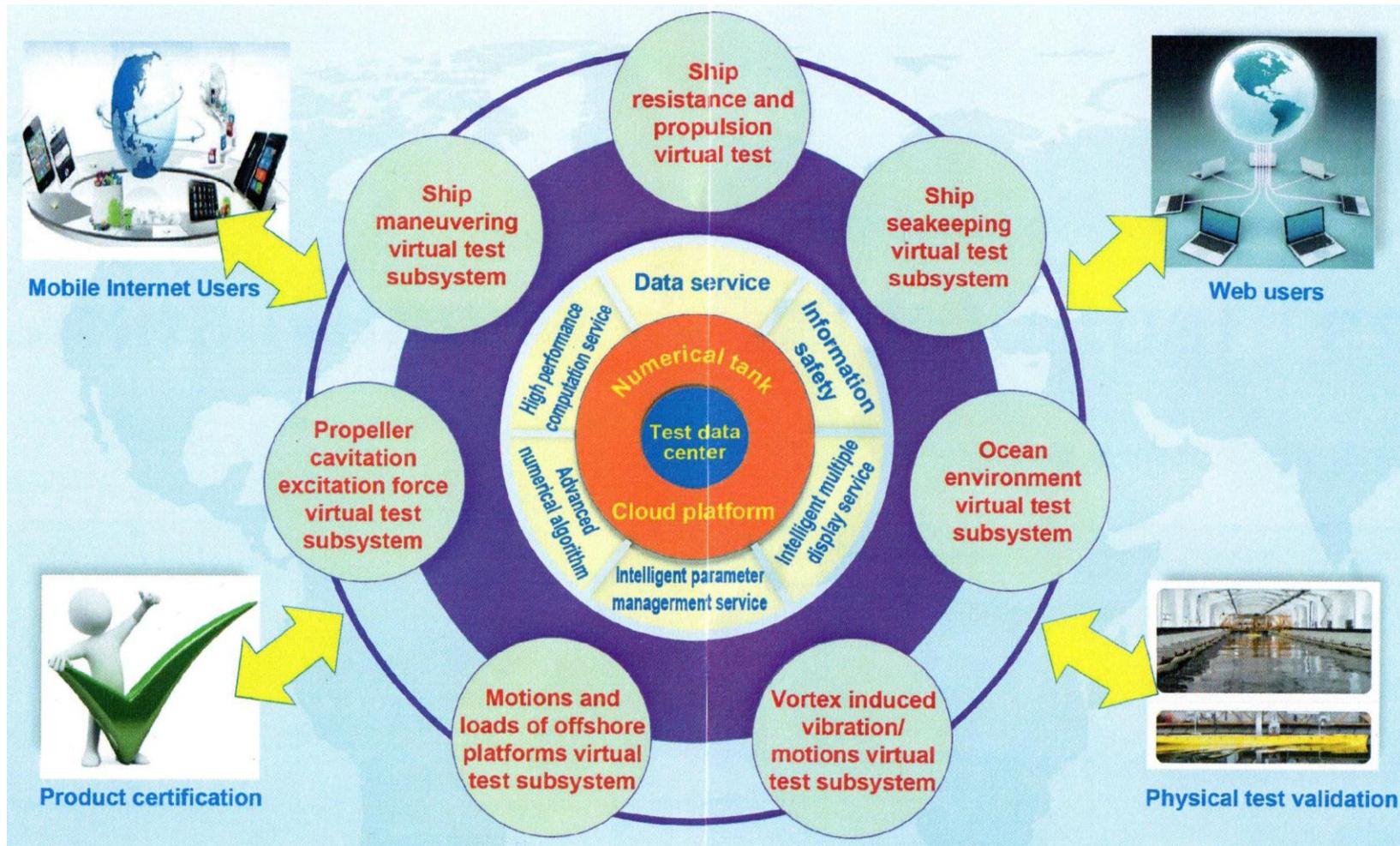


Интегрированная среда разработки позволяет решать мультидисциплинарные задачи, реализует согласованный и квалифицированный инструментарий, объединяет доверенные источники исходных данных и библиотеки типовых решений

Виртуальный опытовый бассейн, Харбинский инженерный университет, КНР



China Numerical Tank Virtual Test System



Основные сферы применения методов численной гидродинамики и суперкомпьютерных технологий

Опыт использования численных методов в «Крыловском государственном научном центре» показывает, что применение численного моделирования в корабельной гидродинамике позволяет:

- расширить возможности экспериментальной базы при изучении особенностей протекания физических процессов, при этом на первый план выходит анализ локальных особенностей течения и развитие их во времени;
- выявить основные факторы, определяющие свойства изучаемого объекта, за счет логичности и формализованности компьютерных моделей;
- повысить точность прогнозирования характеристик проектируемого объекта применительно к натурным условиям;
- снизить долю физического эксперимента на ранних этапах создания объектов МТ с возможностью увеличения необходимого количества исследований в обеспечение прорывных характеристик объектов МТ;
- повысить качество проектируемых объектов МТ за счет автоматизации и оптимизации исследовательских и проектных процессов.