



Перспективные задачи корабельной гидродинамики: решения и ресурсы.

М.П. Лобачев

“V Московский Суперкомпьютерный Форум ” (МСКФ-2014)

Москва 21 октября 2014 г.



Возможности численных методов в судостроении

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

- сократить объем испытаний рассматриваемых объектов и, соответственно, стоимость и сроки выполнения проектных работ;
- принимать более обоснованное решение при выборе конструкции проектируемого объекта;
- повысить точность прогнозирования характеристик проектируемого объекта применительно к натурным условиям;
- повысить эффективность и, следовательно, конкурентоспособность проектируемого объекта.



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.

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 будущем: суперкомпьютеры 250-350 Тфлопс, периодически суперкомпьютеры 1-10 Петафлопс.



Основные сферы применения методов численной гидродинамики в судостроении

- **Предварительная отработка формы обводов**, т.е. расчеты с вариацией формы с целью получения либо наилучших, либо заданных гидродинамических характеристик. С дальнейшим изготовлением модели и проведением её испытаний.
- **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.
- **Оценка «масштабного эффекта»**, т.е. сопоставительные расчеты для условий проведения модельного эксперимента и натурных условий.
- **Численное моделирование, полностью заменяющее физический эксперимент.** В настоящее время это весьма редкая ситуация. 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.



Располагаемые вычислительные мощности

Общая пиковая производительность: 56.12 TFLOPS

Общая пиковая производительность без учета GPU: **44.42 TFLOPS**

Общий объем оперативной памяти вычислительных узлов: 9280 ГБ

Машины с общей памятью (SMP): четыре узла по 256 ГБ и один узел 2048 ГБ

Коммуникационная сеть: QDR Infiniband

Пиковая производительность первой очереди: **21,12 TFLOPS**

Количество процессоров: 200 шт. (**2400 ядер**)

Процессор: AMD Opteron 6174

Тактовая частота: 2,2 ГГц

Объем оперативной памяти: 6400 ГБ (64 ГБ памяти на каждый узел, всего 100 узлов)

Пиковая производительность узлов комплекта расширения: **23,3 TFLOPS**

Пиковая производительность вычислительных узлов комплекта расширения с GPU: 11,7 TFLOPS.

Количество процессоров в комплекте расширения: 90шт. (**1080 ядер**)

Процессор: Intel Xeon E5-2697v2 с архитектурой x86_64

Тактовая частота: 2,7 ГГц.

Ускорители: NVIDIA Kepler K20 в количестве 10 шт.

Объем оперативной памяти: 2880 ГБ DDR3 с поддержкой ECC 1600 МГц (64 ГБ памяти на каждый узел, всего 45 узлов)



Регулярно решаемые в настоящее время задачи

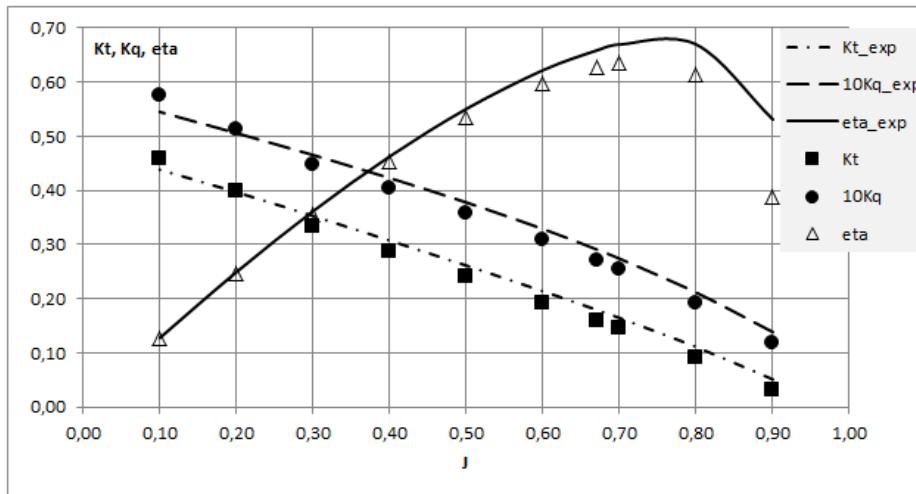
	Задача	Размер- ность сетки, млн. ячеек	Использу- емое число ядер	Пиковая производительность использованной части кластера, ТФлопс.	Число решенных за 2012 год задач
1	Расчет обтекания корпуса	8.2	144	1.26	61
2	Расчет обтекания движителя в однородном потоке	8-16	168-336	1.47-2.94	246
3	Расчет обтекания движителя за корпусом корабля	17	336	2.94	41
4	Расчет многолопастного, многорядного движителя за корпусом	131	2328	20.37	16

**Учтены только задачи решавшиеся по отработанным
методикам**

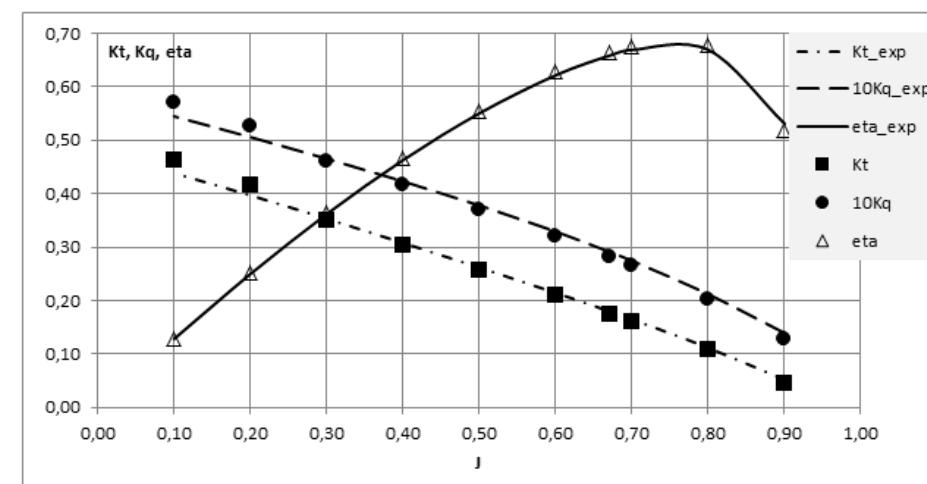
Расчет обтекания гребного винта в свободной воде

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛАМИНАРНО-ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕХОДА

Модель турбулентности k - ω SST

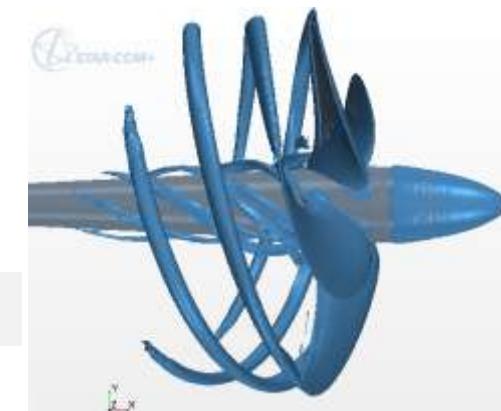


Модель турбулентности k - ω SST + γ - Re_θ



Погрешности на рабочем режиме ($J=0.67$)

модель	K_T (упор)	K_Q (момент)	η_0 (кпд)
k - ω SST	10.9%	6.4%	3.2%
k - ω SST + γ - Re_θ	2.5%	2.3%	0.2%



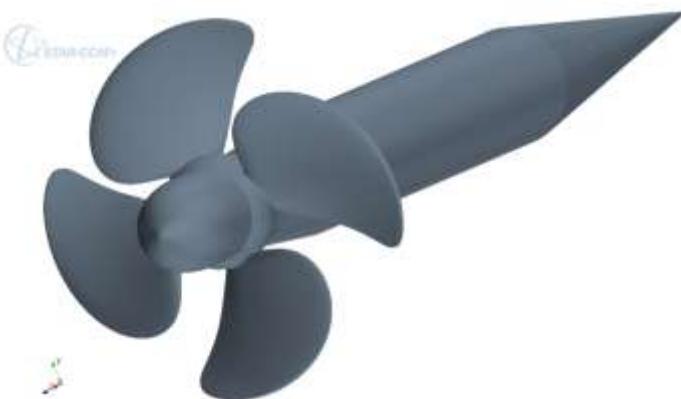
Визуализация вихревых систем

Расчётная сетка 8.85 млн.

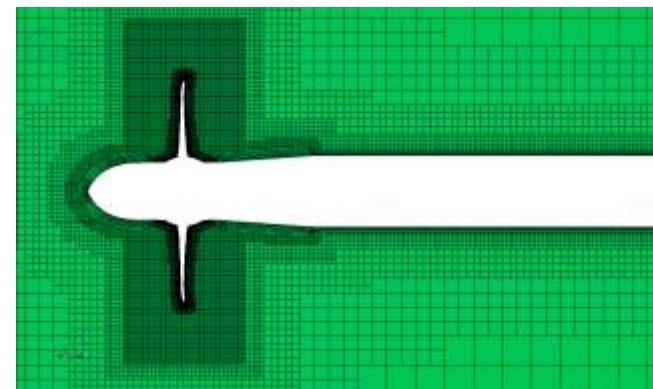
Q-критерий ($Q=10000$)

Расчет обтекания гребного винта в свободной воде

Винт регулируемого шага (ВРШ)



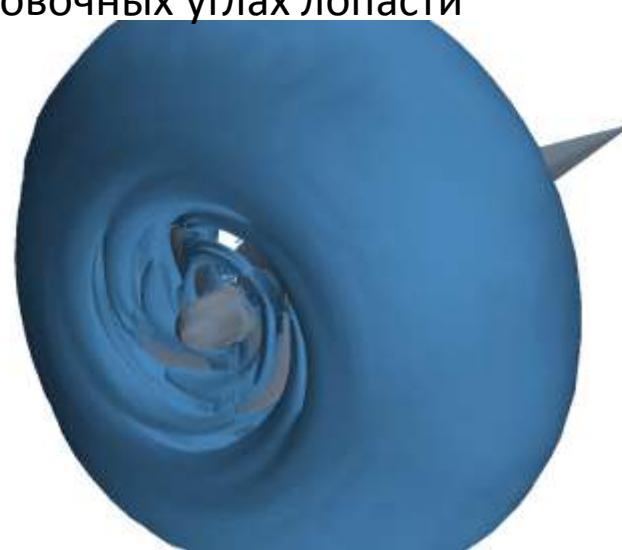
Расчетная сетка от 15 до 40 млн. ячеек в зависимости от размера вихревых структур



Вихревые структуры при разных установочных углах лопасти



$J = 0.8, \Psi = 0 \text{ deg}$

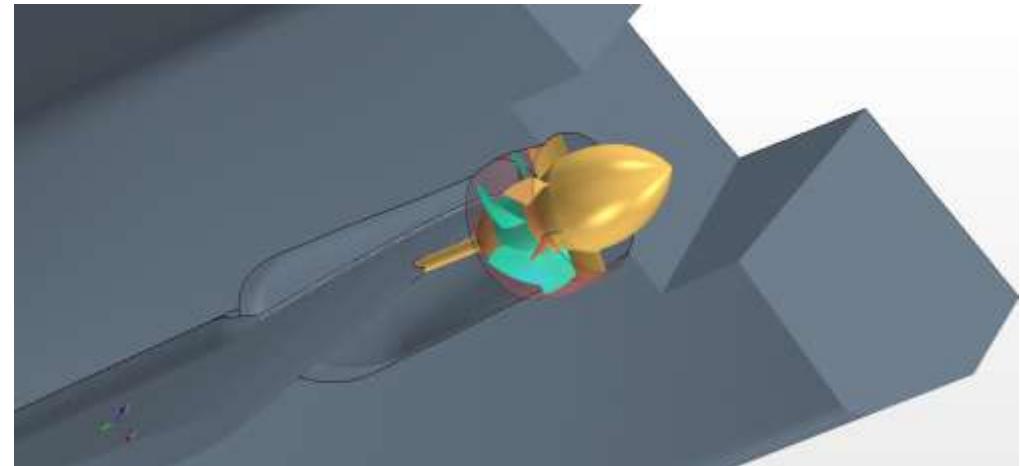


$J = 0.8, \Psi = -45 \text{ deg}$

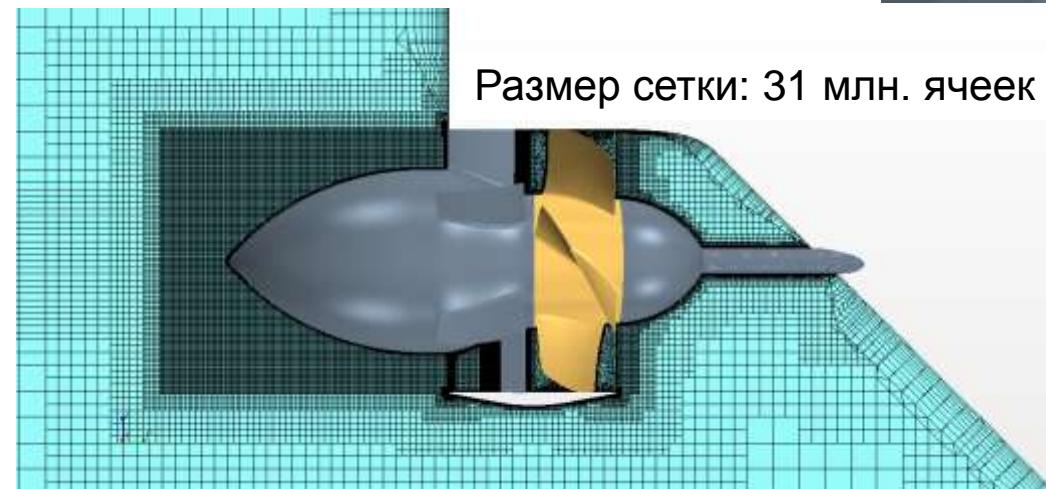
Многолопастной, многорядный движитель за корпусом дополнение эксперимента

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ВОДОМЕТНОГО ДВИЖИТЕЛЯ.

Объект исследования – водометный движитель



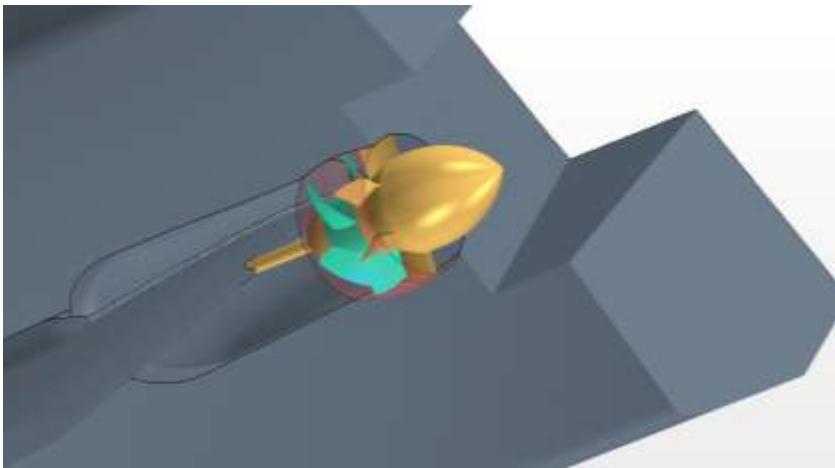
Размер сетки: 31 млн. ячеек



Дополнение эксперимента

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ВОДОМЕТНОГО ДВИЖИТЕЛЯ.

Объект исследования – водометный движитель



Размер сетки: 31 млн. ячеек



Сравнение результатов расчета и экспериментальных данных

J	Эксперимент		Расчет	
	Kt	10Kq	Kt	10Kq
1,3	0,772	1,885	0,78	2,13
1,4	0,755	1,84	0,76	2,09
1,5	0,723	1,77	0,73	2,05
1,6	0,703	1,7	0,71	1,99
1,7	0,678	1,67	0,68	1,94

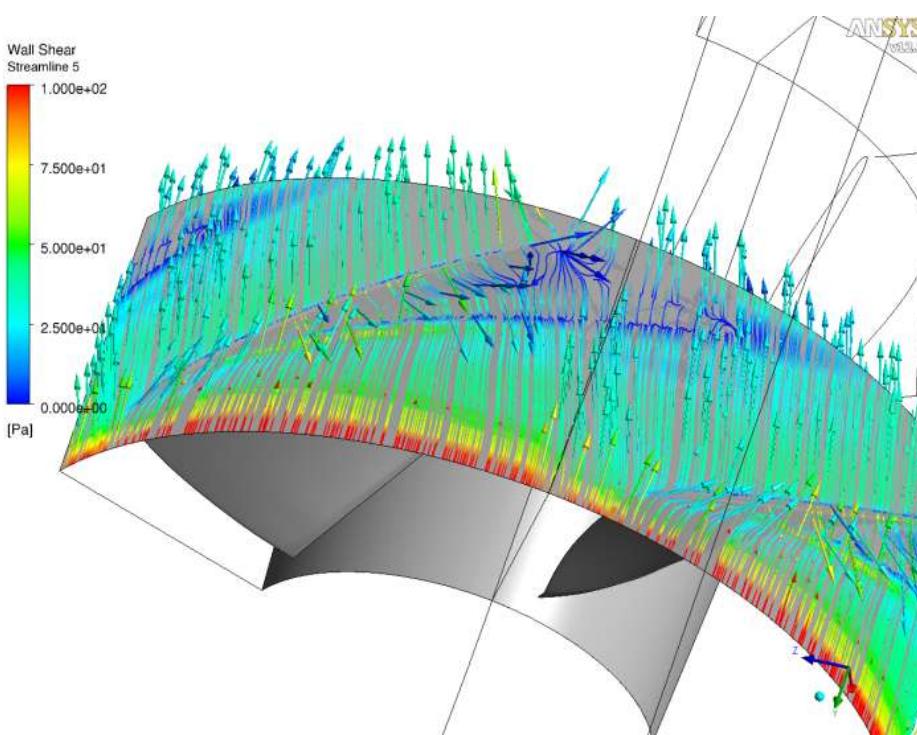
Kt – коэффициент упора

Kq – коэффициент момента

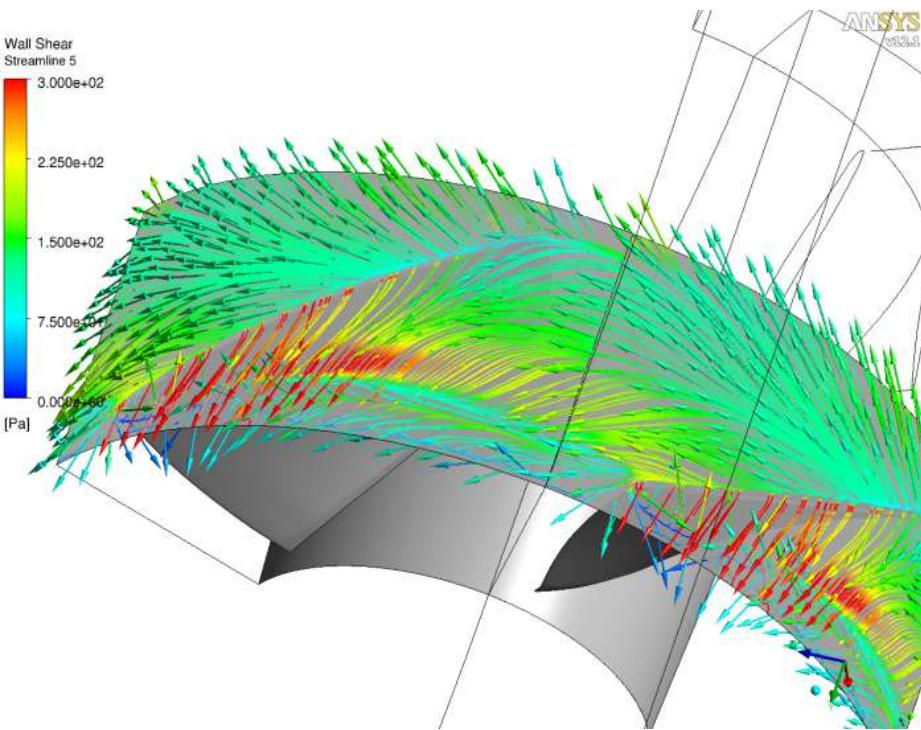
Дополнение эксперимента

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ВОДОМЕТНОГО ДВИЖИТЕЛЯ.

$J=1,6$



$J=0,8$

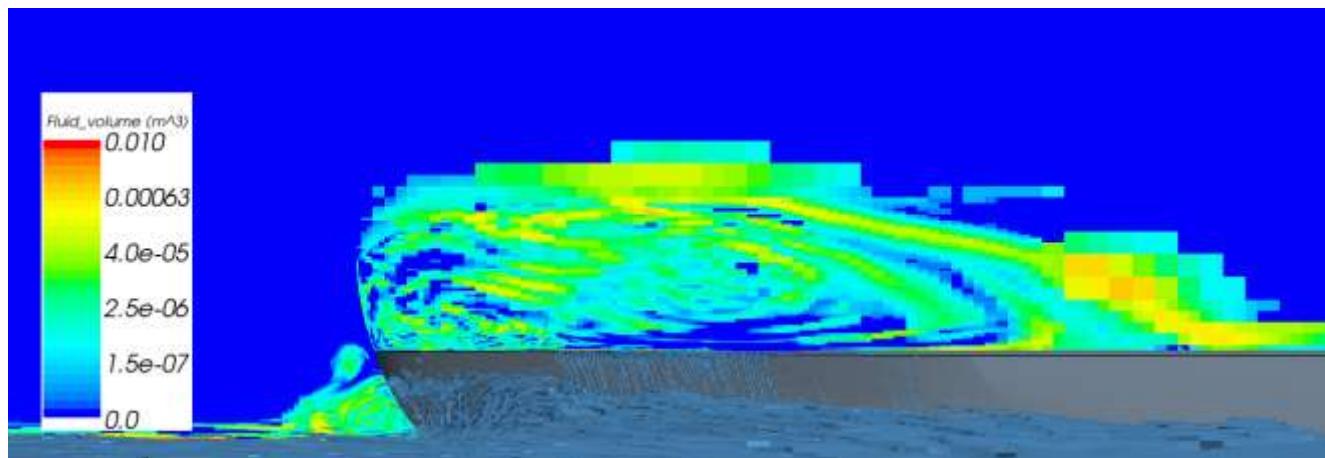
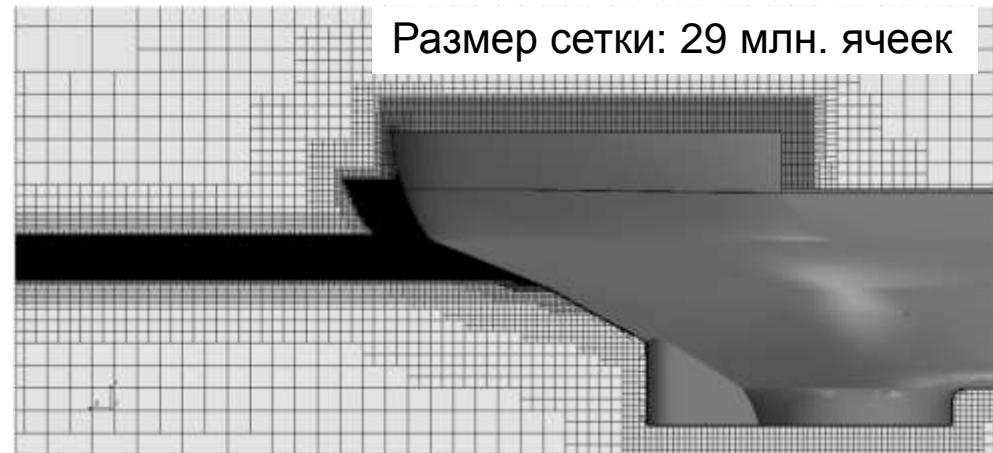


Размер сетки 60 млн. При более подробном разрешении зазора до 250 млн.

Картины поверхностных линий тока (в неподвижной системе отсчета) на внутренней стороне насадки в зоне рабочего колеса. Линии тока окрашены по значениям напряжения трения на стенке.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАЛИВАЕМОСТИ И БРЫЗГООБРАЗОВАНИЯ В НОСОВОЙ ОКОНЕЧНОСТИ ТУРЕЛЬНОГО СУДНА

Объект исследования – турельное судно



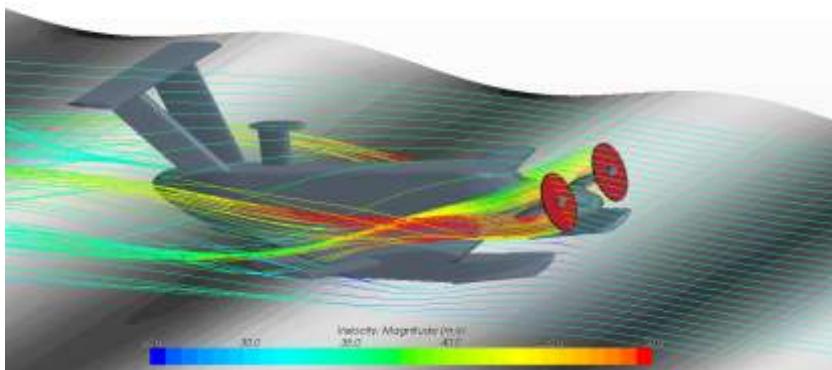
Мгновенное распределение объемов воды в ячейках диаметральной плоскости

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АЭРОДИНАМИКИ ЭКРАНОПЛАНА С УЧЕТОМ ВОЛНЕНИЯ

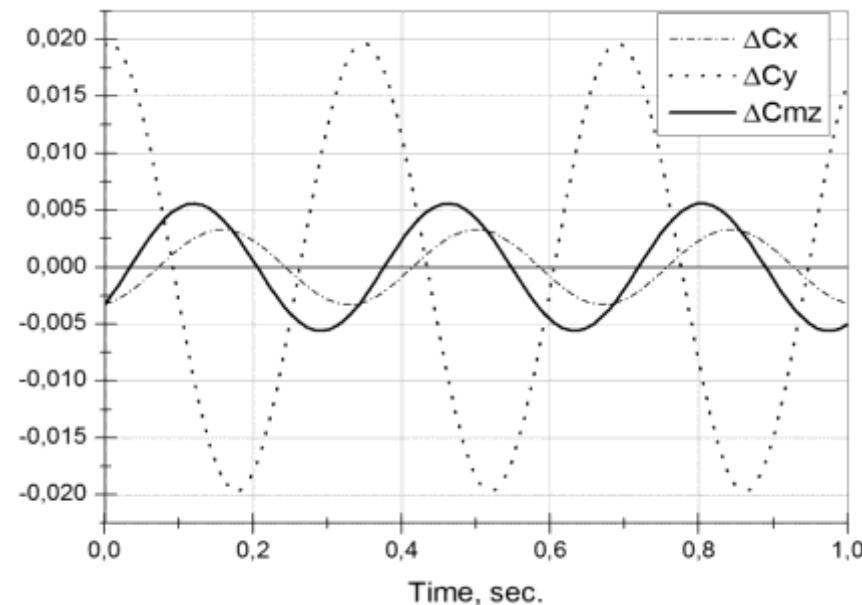
Объект исследования – экраноплан проекта «Орион-20» в натурных размерах.

Определялось изменение аэродинамической силы и момента тангажа экраноплана при движении над регулярным волнением

Размер сетки: 6 млн. ячеек



Визуализация обтекания экраноплана
(режим взлета с поддувом носовых
двигателей под центроплан)



Временная зависимость отклонения от средних значений коэффициентов подъемной силы и силы сопротивления и момента тангажа в режиме взлета над волнением
(длина волны – 20 м, высота волны – 0.4 м)

	Задача	Размер- ность сетки, млн. ячеек	Использу- емое число ядер	Пиковая производительность использованной части кластера, ТФлопс.
1	Расчет обтекания корпуса корабля с учетом выступающих частей (кронштейны, валы, рули)	24	480	4.2
2	Расчет обтекания корпуса ПЛ с учетом оперения	41	816	7.14
3	Расчет обтекания движителя за корпусом корабля с развитыми ВЧ/корпусом ПЛ с учетом оперения	42/60	840/1200	7.35/10.5
4	Расчет обтекания движителя за корпусом корабля с учетом кавитации	168	3360	29.4

Расчеты позволяют сократить объем требуемых модельных испытаний и получать информацию для натурных условий, что обеспечивает принятие более обоснованных технических решений



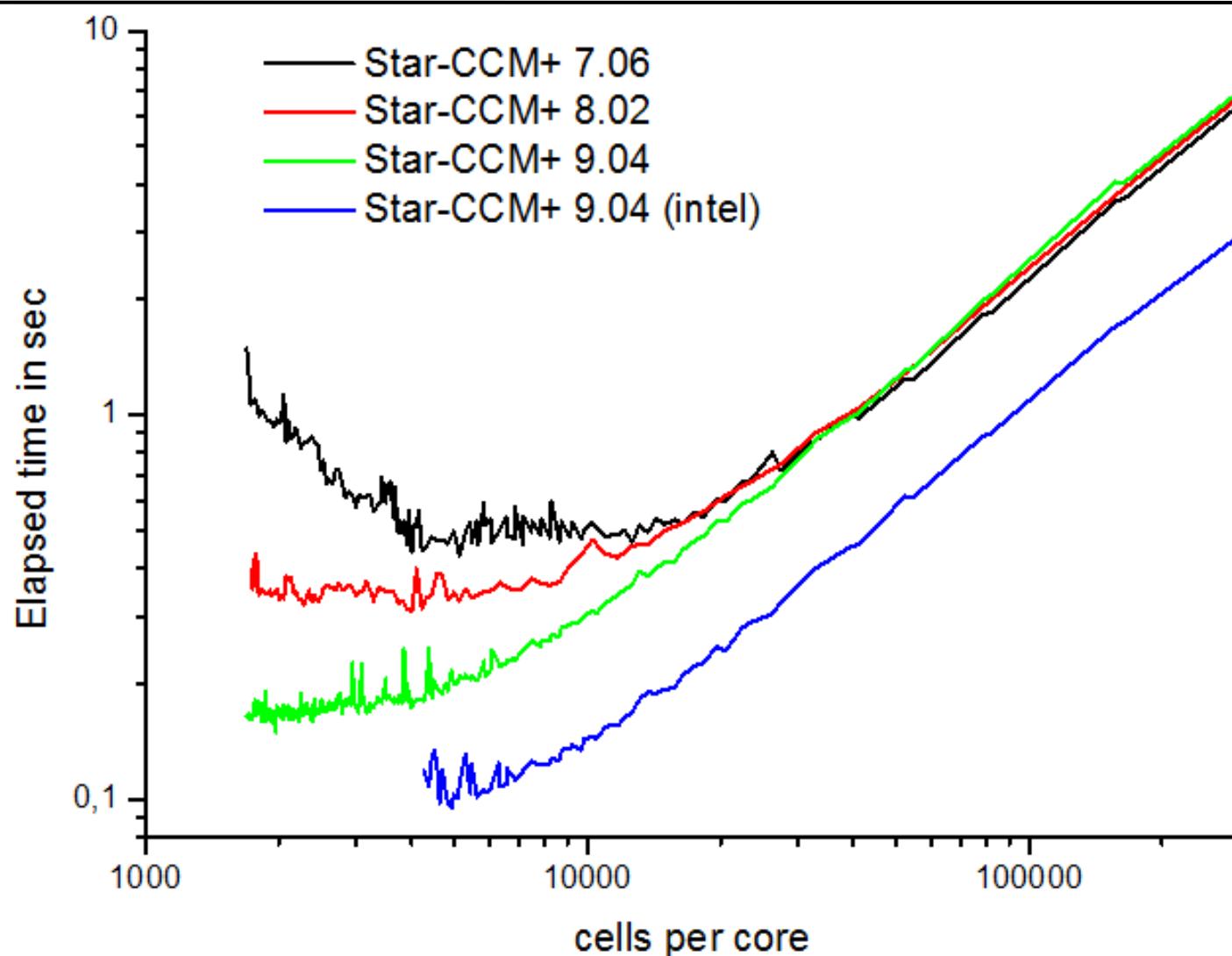
Задачи гидродинамики по линии ОПК требующие решения

Прогноз на основе предварительных расчетов упрощенных моделей

	Задача	Размер- ность сетки, млн. ячеек	Использу- емое число ядер	Пиковая производительность использованной части кластера, ТФлопс.
1	Расчет обтекания гребного винта/рабочего колеса за корпусом с учетом деформации лопасти под воздействием турбулентных пульсаций	1240	26400	231
2	Расчет пульсационных характеристик в пограничном слое ПЛ	3000	60000	525
3	Расчет пульсационных характеристик пограничного слоя (упрощенная постановка)	300	6000	52.5

**Данные задачи могут быть решены только расчетным путем.
Постановка модельного эксперимента невозможна в принципе**

Минимально допустимое кол-во ячеек на ядро





Программное обеспечение имеющееся сейчас

Зарубежное ПО

Разработчик/ правообладатель	Программный продукт
CD-Adapco	Star CCM+, Star-CD
Ansys	Fluent, CFX
Numeca	NUMECA FINE/Marine

Отечественное ПО

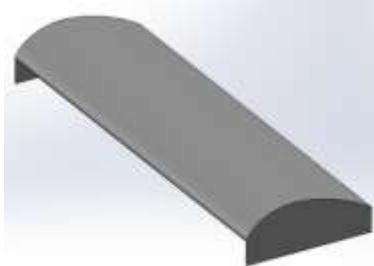
Разработчик	Программный продукт
ФГУП "РФЯЦ-ВНИИ ЭФ"	ЛОГОС
"Тесис"	FlowVision

Открытый код (GNU General Public License)

OpenCFD Ltd (ESI Group)*	OpenFOAM
--------------------------	----------

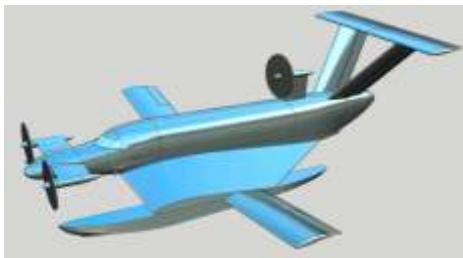
* Основной коллектив (условно)

Доля сопротивления трения



крыло
конечного
размаха

модель
 $\Delta C_x(\text{трения})=31\% - (\alpha=0^\circ)$
 $\Delta C_x(\text{трения})=11\% - (\alpha=8^\circ)$



экраноплан
«Орион-20»

натура
 $\Delta C_x(\text{трения})=46\% \text{ (натура, } \alpha=0^\circ, h/L=\infty)$
 $\Delta C_x(\text{трения})=36\% \text{ (натура, } \alpha=8^\circ, h/L=0,2)$



танкер - газовоз

модель
 $\Delta C_x(\text{трения})=60\% - \text{к полному}$
 $\Delta C_x(\text{трения})=87\% - \text{к вязкостному}$



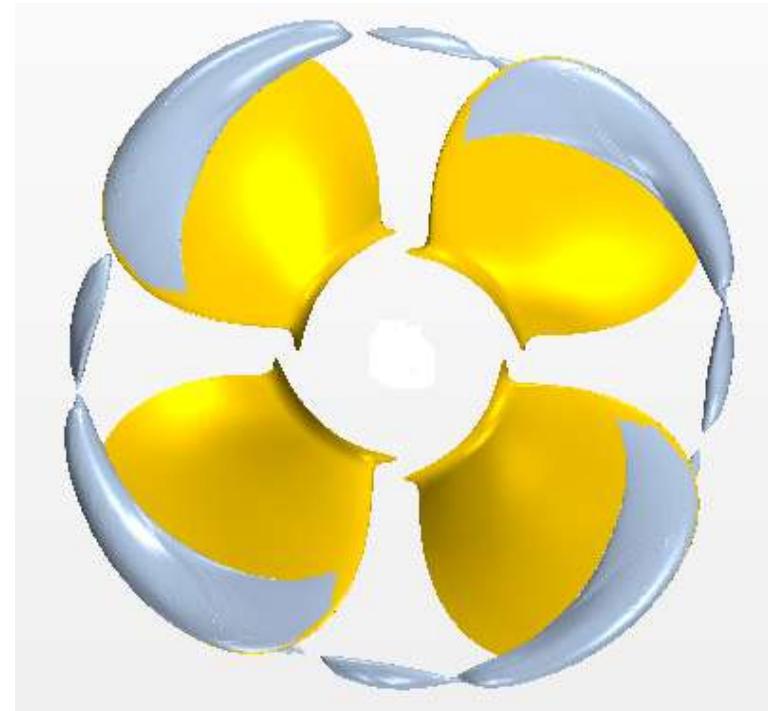
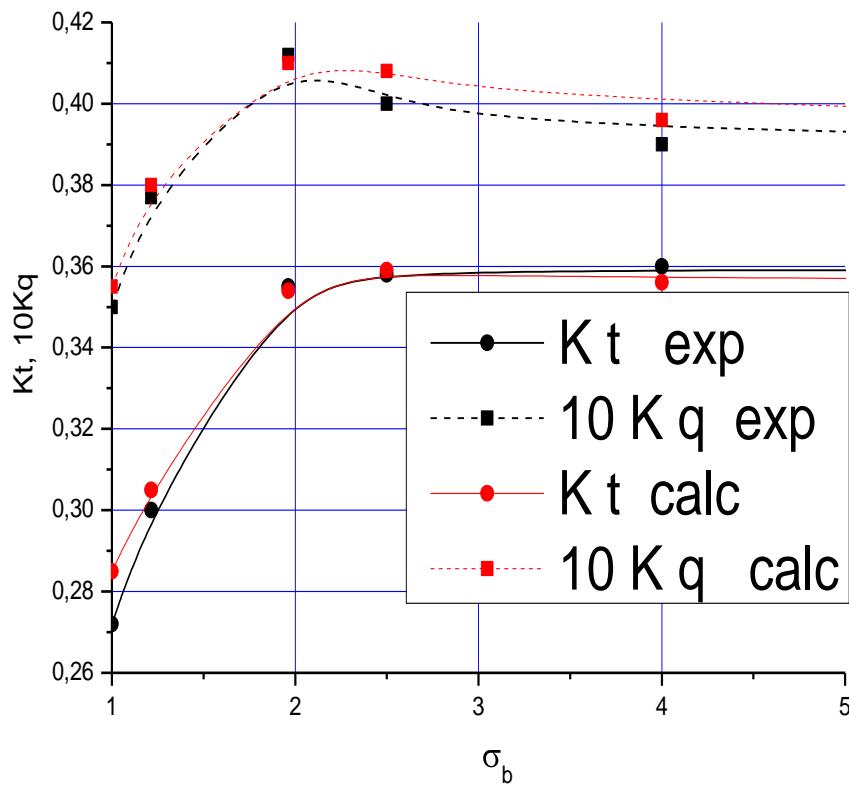
Схематизированная
ПЛ

модель
 $\Delta C_x(\text{трения})=82\% (\alpha=0^\circ, \delta=0^\circ)$

Ни в одном пакете сопротивление трения не рассчитывается достаточно точно.

Отработка технологии выполнения расчетов время разработки 4 года (2+1+1)

ЗАВИСИМОСТИ КОЭФФИЦИЕНТОВ УПОРА И МОМЕНТА МОДЕЛИ ГРЕБНОГО ВИНТА СУДНА ЛЕДОВОГО КЛАССА НА ШВАРТОВОМ РЕЖИМЕ ОТ ЧИСЛА КАВИТАЦИИ





Предложения Крыловского центра по созданию ПО

В каждой отрасли есть свои особенности. В корабельной гидродинамике во многих задачах большая доля сопротивления трения. Большие проблемы с расчетом нестационарных кавитационных течений. Однако, как показывает практика, разработчики ПО оторванные от конкретных отраслей на такие «мелочи» не обращают внимание.

Опыт «Крыловского государственного научного центра» показывает, что только сочетание усилий непосредственных пользователей и разработчиков ПО может привести к разработке ПО, пригодного для обеспечения реальных проектных работ.

Международный опыт (США, Германия) показывает, что наиболее перспективным путем развития является доработка под конкретные отрасли программ с открытым кодом. В операционных системах такой пример дает ОС Linux, которой оснащены 90% суперкомпьютеров из списка Топ 500. В корабельной гидродинамике это может быть OpenFOAM.



Предложения Крыловского центра по созданию ПО

Тема «Лицензия» / «Открытый код»

(кооперация 6 организаций в доработке OpenFOAM для судостроения)

Стоимость работы: 220 млн. руб. (2012 г.)

Срок выполнения : 3 года.

Срок окупаемости: 5,5 лет (коллектив 10 человек).

Расчет срока окупаемости на примере коллектива из 10 человек.

Стоимость годовых лицензий (млн. руб.):

Программный продукт	К-во	Цена одной	Стоимость
STAR-CCM+ для 1 пользователя, 2 ядра	10	0,3682	3,682
STAR-CCM+ для 1 пользователя, неограниченное количество ядер	30	1,172	35,16
STAR-CCM+/CAD Exchange	3	0,0506	0,1518
STAR-CCM+/per STAR-NX Enabled	3	0,065	0,195
Итого:			39,19



Амортизационные группы

ПРАВИТЕЛЬСТВО РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

- ПОСТАНОВЛЕНИЕ от 1 января 2002 г. N 1
«О КЛАССИФИКАЦИИ ОСНОВНЫХ СРЕДСТВ,
ВКЛЮЧАЕМЫХ В АМОРТИЗАЦИОННЫЕ ГРУППЫ»
- ПОСТАНОВЛЕНИЕ от 18 ноября 2006 г. N 697
«О ВНЕСЕНИИ ИЗМЕНЕНИЙ
В КЛАССИФИКАЦИЮ ОСНОВНЫХ СРЕДСТВ, ВКЛЮЧАЕМЫХ
В АМОРТИЗАЦИОННЫЕ ГРУППЫ»

**Вторая группа (имущество со сроком полезного использования
свыше 2 лет до 3 лет включительно)**

14 3020000 **Техника электронно-вычислительная**

включая персональные компьютеры и печатающие устройства к ним;
серверы различной производительности; сетевое оборудование локальных
вычислительных сетей; системы хранения данных; модемы для локальных
сетей; модемы для магистральных сетей

**Срок амортизации меньше гарантийного срока!!! Это резко
увеличивает на начальном этапе стоимость машинного времени.**



Правовые аспекты

Определение нагрузок на высотные здания и сооружения: территориальный регламент г. Москва - эксперимент и расчет; территориальный регламент г. Санкт-Петербург – эксперимент.

Стоимость машинного времени часто не принимается Заказчиком при определении общей стоимости работы. Например, военной приемкой.

Для ряда работ обязательным является проведение определенного количества экспериментов при приемке новых изделий в эксплуатацию. Хотя при этом достаточно провести существенно меньшее количество экспериментов только для подтверждения правильности расчетов. Например, по профилю ОАО «ЦНИИ «Буревестник».



Заключение

- Применение суперкомпьютерных технологий в промышленности стало реальной необходимостью. Использование высокопроизводительных вычислений позволяет добиваться значительного упрощения внедрения в производственные и научно-исследовательские процессы инновационных технологий и снижения материальных и временных затрат на разработку новых изделий гражданской и военной техники;
- Современное состояние суперкомпьютерных технологий позволяет научно-исследовательским и промышленным предприятиям добиваться существенного повышения эффективности научно-исследовательских, проектно-конструкторских и технологических работ, причем наибольшую эффективность данные технологии демонстрируют в тех областях, где физические эксперименты требуют значительных затрат или невозможны;
- основными препятствиями, мешающими эффективному использованию суперкомпьютерных технологий в промышленности, являются:
 - отсутствие документов нормативного и планового характера, регламентирующих развитие и использование суперкомпьютерных технологий в промышленности;
 - отсутствие необходимого количества доступных вычислительных мощностей;
 - высокая стоимость программного обеспечения, применяемого для моделирования на суперкомпьютерах, и для ряда практических задач недостаточная точность решения;
 - отсутствие фундаментальных и прикладных НИОКР в области разработки инновационного аппаратного обеспечения и элементной базы, вычислительных методов и алгоритмов, программного обеспечения;
 - дефицит квалифицированных инженерно-технических кадров в данной сфере.