



# **Анализ ходовых качеств яхты с помощью программного комплекса FlowVision**

Авторы: Михайлова Марина Константиновна

Щеляев Александр Евгеньевич

Организация: ООО ТЕСИС

Контакты: [marina@flowvision.ru](mailto:marina@flowvision.ru);

[alex@flowvision.ru](mailto:alex@flowvision.ru)

**Москва, 6-7 апреля 2015 г.**

## Цель работы

- **Определение места FlowVision в проектировании яхт**
- **Сравнение результатов расчета FlowVision с традиционными методами расчета**

## Решаемые задачи

- **Определение буксировочного сопротивления судна, сравнение с традиционными методиками расчета**
- **Определение режима движения судна**

## Как справлялись до появления CFD пакетов

- Упрощенные формулы и графики, связывающие скорость судна с мощностью и основными характеристиками
- Систематические серии результатов испытаний моделей с систематически меняющимися параметрами
- Серии схематизированных моделей
- Статистические методы, основанные на результатах анализа не связанных между собой результатах испытания моделей
- Испытания моделей в бассейнах

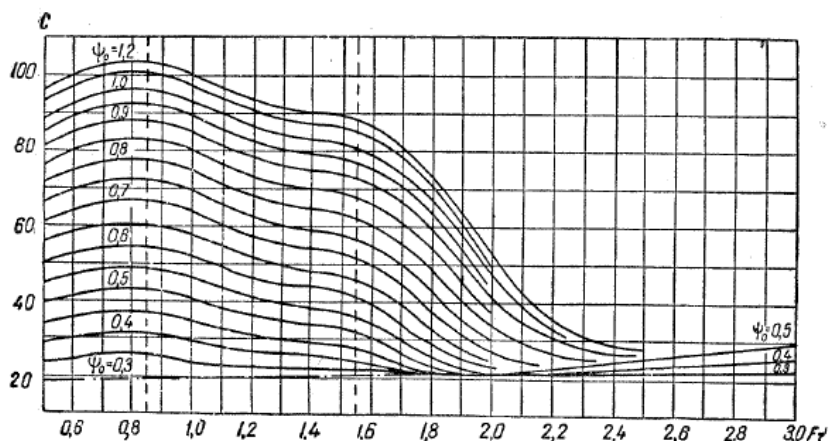
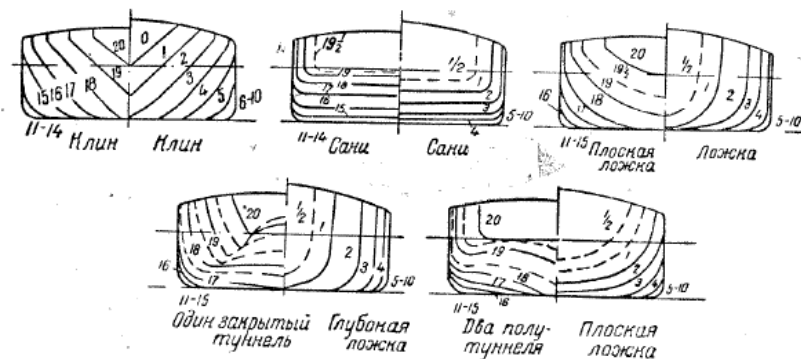


График для определения буксировочной мощности судна по методу Э.Э. Пампеля\*



Форма обводов оконечностей корпуса речных судов\*

\*Басин А.М., Анфимов В.Н Гидродинамика судна, Изд. Речной транспорт, Ленинград 1961 г.

# **Задача 1**

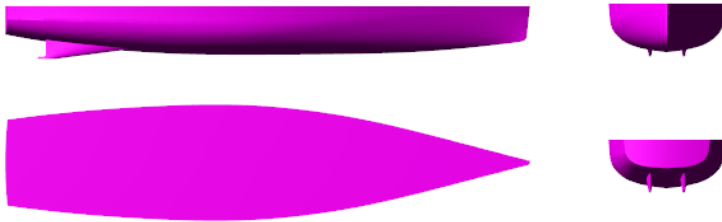
## **Верификация определения буксировочного сопротивления судна**



Размеры яхты 30,94x6,89x3,13 м. Посадка судна по плоскости  $z=0$ , Водоизмещение 85,56 тонн. Скорость судна крейсерская - 11 узлов, максимальная – 15 узлов

Моделируется обтекание зафиксированного судна потоком воды. Скорость потока меняется от 5 до 20 узлов

Цель исследования: сравнить силу сопротивления судна с проведенными ранее расчетами.



Задача решается в симметричной (половинной) постановке. Размеры расчетной области 150\*60\*50 м.

Глубина водоема составляет 30 м.

При расчете учитывается гравитация,  $g_z = 9.8 \text{ м/с}^2$

Учитываются различные скорости течения от 5 до 20 узлов

Модель и расчетные данные любезно предоставлены Albatross Marine Design Co



В процессе моделирования решаются следующие уравнения  
Уравнения импульсов и неразрывности

$$\frac{\partial \rho V}{\partial t} + \nabla(\rho V \otimes V) = -\nabla P + \nabla \left[ (\mu + \mu_t) \cdot (\nabla V + (\nabla V)^T) \right] + S$$

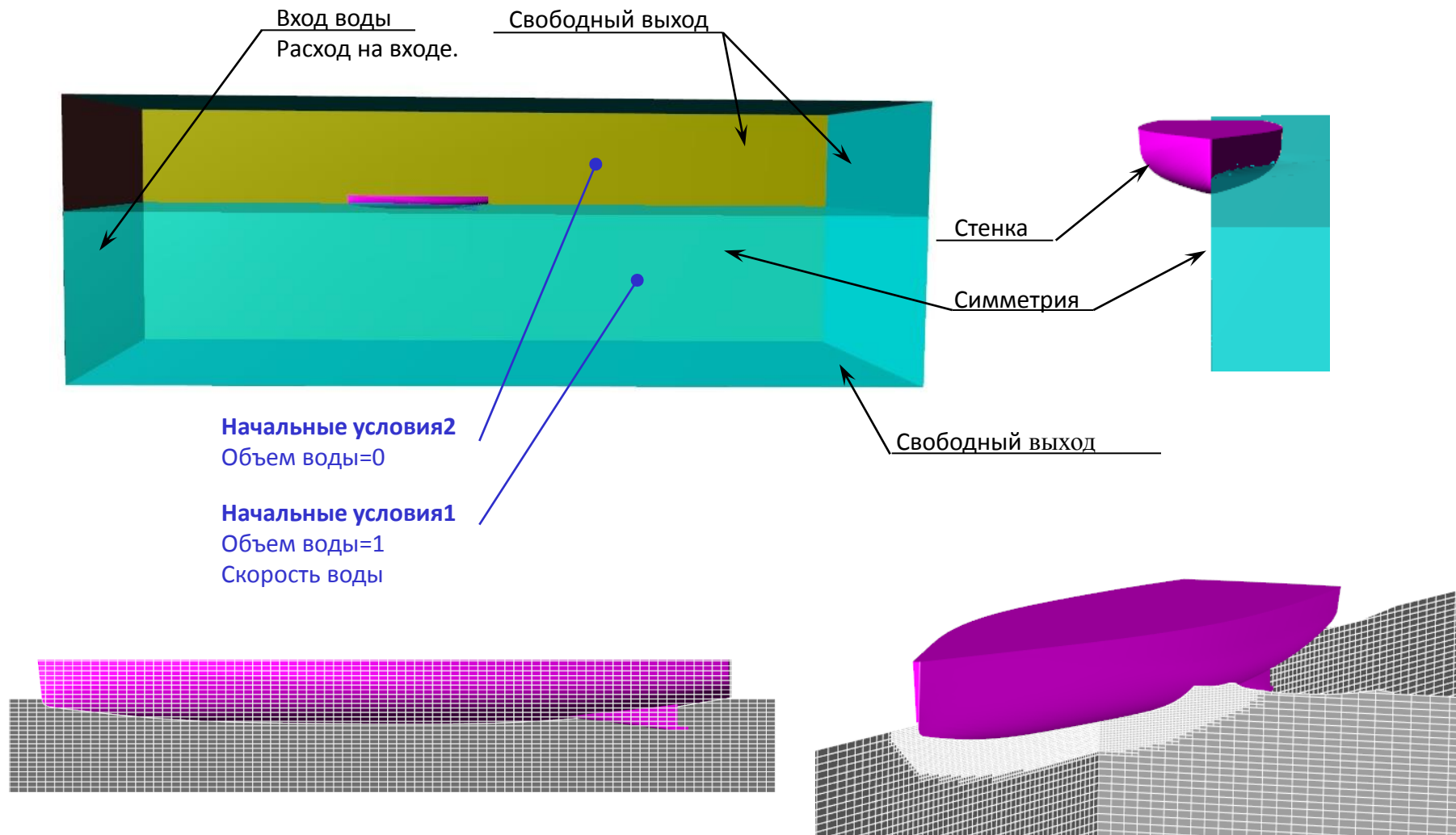
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho V) = 0$$

Уравнения k-е модели турбулентности

$$\mu_t = c_\mu \cdot \rho \cdot \frac{k^2}{\varepsilon}$$

$$\frac{\partial(\rho \cdot k)}{\partial t} + \nabla(\rho \cdot V \cdot k) = \nabla \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + \mu_t \cdot G - \rho \cdot \varepsilon$$

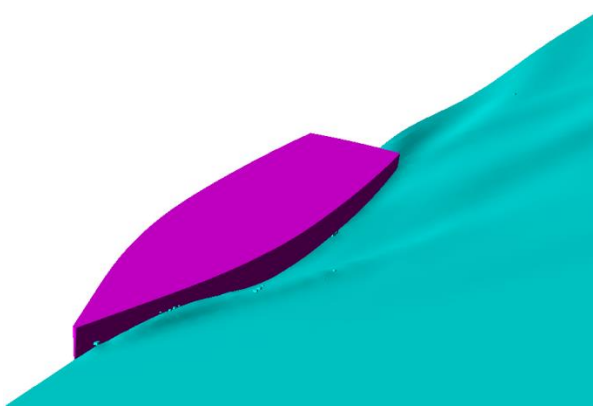
$$\frac{\partial(\rho \cdot \varepsilon)}{\partial t} + \nabla(\rho \cdot V \cdot \varepsilon) = \nabla \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla \varepsilon \right] + C_1 \cdot \frac{\varepsilon}{k} \cdot \mu_t \cdot G - C_2 \cdot f_1 \cdot \rho \cdot \frac{\varepsilon^2}{k}$$



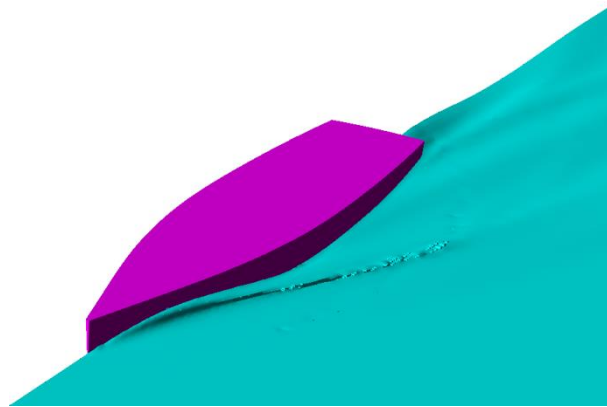
Начальная сетка – 400 000 ячеек

Проадаптированная сетка – 600 000 ячеек

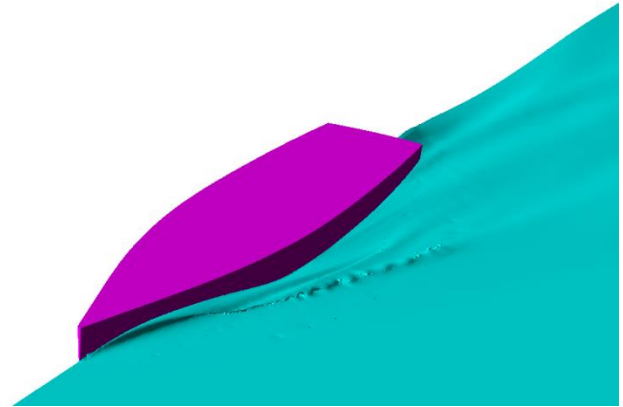
Проводится адаптация по поверхности лодки в 20 слоев 1 и 2 уровень



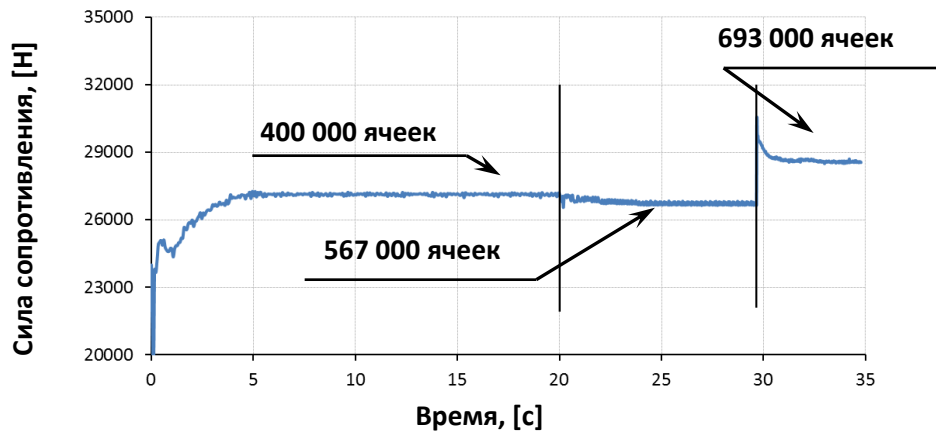
Начальная сетка  
400 000 ячеек



Адаптация 1 уровня  
567 000 ячеек



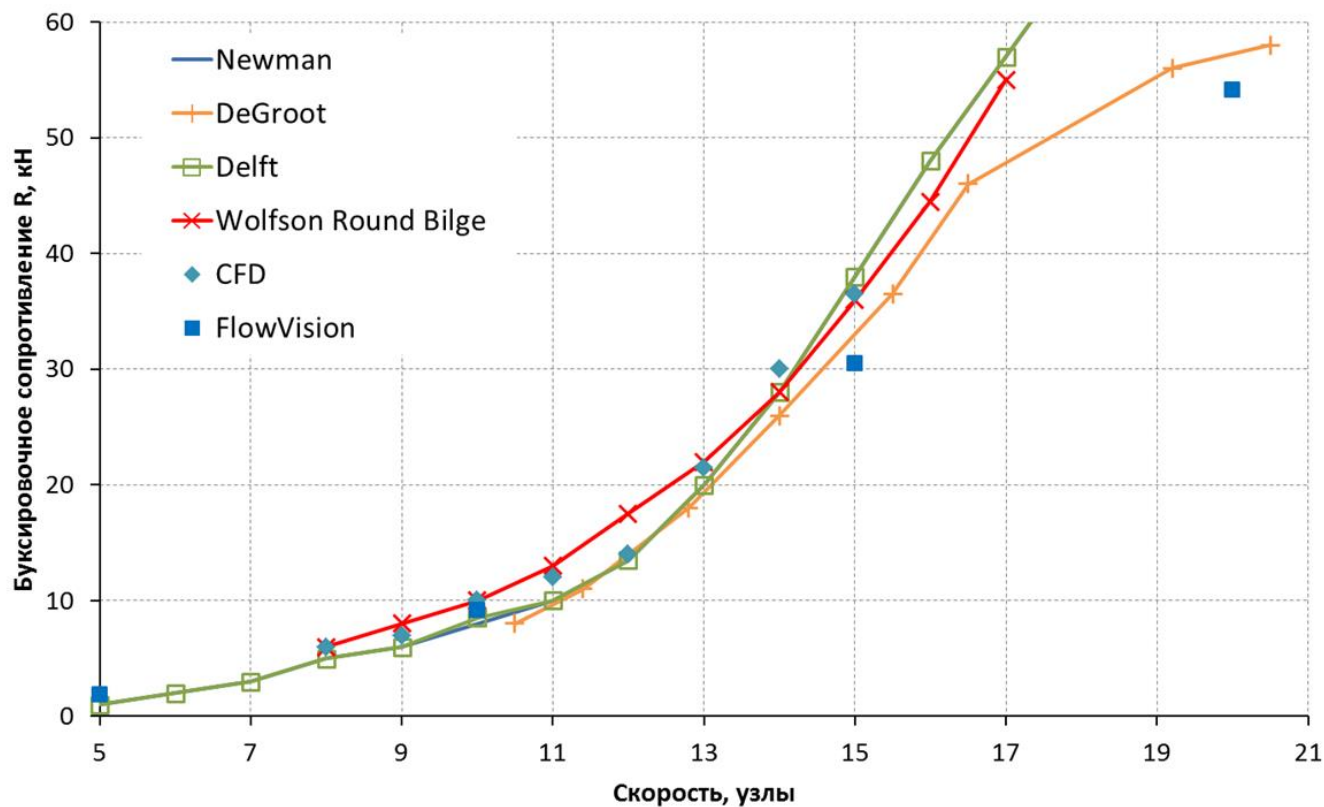
Адаптация 2 уровня  
693 000 ячеек



Количество ячеек	Сила сопротивления, Н	Изменения силы, %
400 000	27 100	--
567 000	26 720	1.4%
693 000	28 580	5.1%

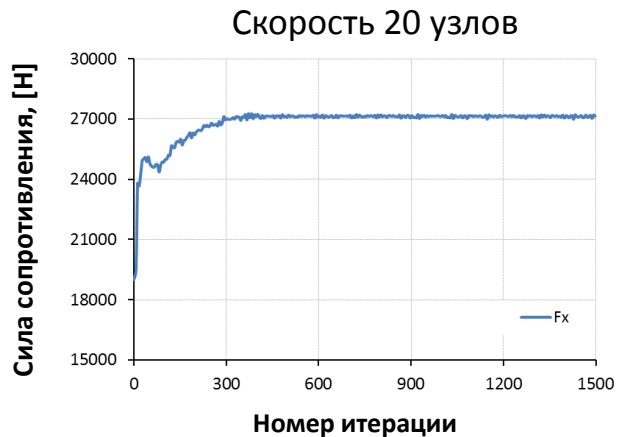


## Интегральные результаты расчета

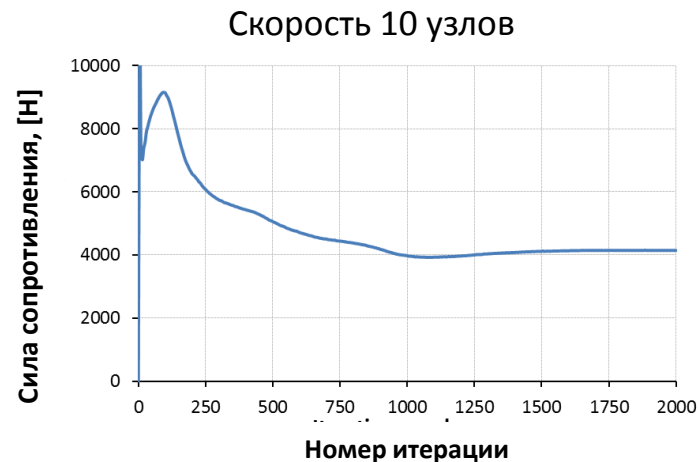


FlowVision хорошо согласуется с другими расчетами

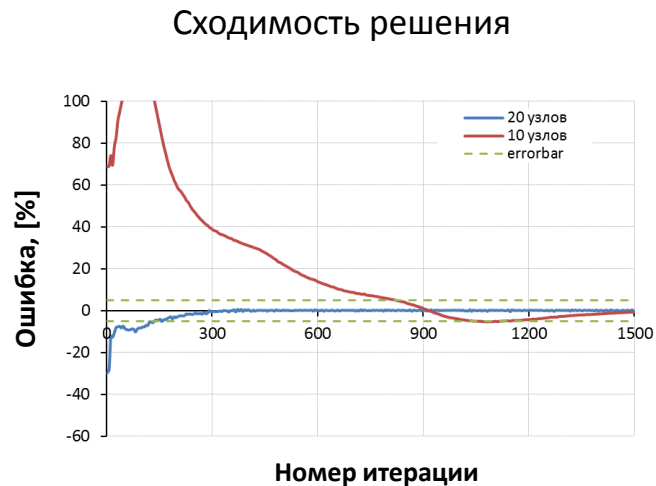
## График сходимости задачи



Время одной итерации\* – 27,9 с



Время одной итерации\* – 29,8 с



## Время решения задачи

Скорость	Число итераций	Время решения*
10 узлов	1500	12 часов
20 узлов	500	4 часа

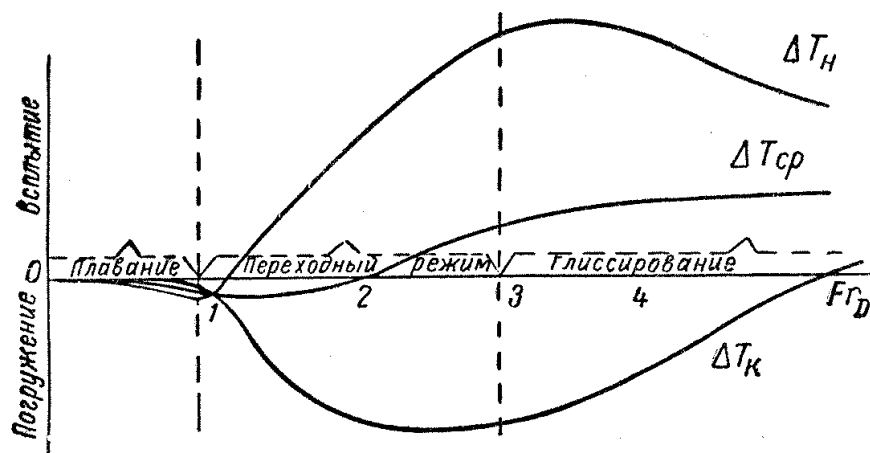
\*Параметры компьютера: Intel Core i7-930 CPU, 2,80 GHz,  
RAM 24 GB, Win7, FlowVision 3.09.03, hypertraiding on  
Режим расчета 1\*8

## **Задача 2.**

### **Качественная оценка изменения режима движения судна**

## Режимы движения судов\*

Режим движения	Характеристики	Начальная скорость, м/с
Режим плавания	<ul style="list-style-type: none"> <li>Небольшая скорость</li> <li>Соблюдение закона Архимеда</li> </ul>	
Переходный режим	<ul style="list-style-type: none"> <li>Возрастание гидродинамической силы поддержания</li> <li>Уменьшение осадки (всплытие)</li> </ul>	$v_1 = 3.14\sqrt[6]{D}$
Глиссирование	<ul style="list-style-type: none"> <li>Скольжение судна по поверхности воды</li> </ul>	$v_2 = 9.45\sqrt[6]{D}$



$D$  – водоизмещение судна, тонна  
 $\Delta T_n$  – изменения погружения носом  
 $\Delta T_{ср}$  – изменения погружения на миделе  
 $\Delta T_k$  – изменения погружения кормой

\*Басин А.М., Анфимов В.Н  
 Гидродинамика судна, Изд. Речной транспорт, Ленинград 1961 г.

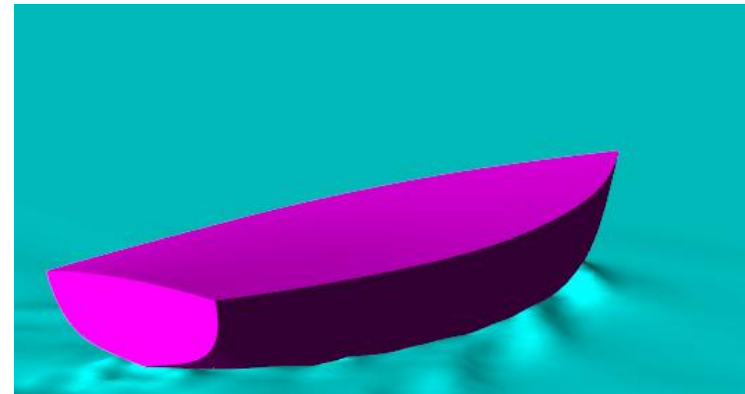
Влияние относительной скорости на изменение посадки судна\*

Моделируется движение яхты в морской воде.

- Водоизмещение яхты 1965 кг.
- Скорость яхты изменяется от 2 до 12 узлов.
- Исследуется яхта с фиксированным положением в пространстве и яхта со степенями свободы по осадке и углу дифферента.
- Скорость начала переходного периода 6,82 узла
- Скорость начала глиссирования 20 узлов (выпадает из исследования)



Яхта

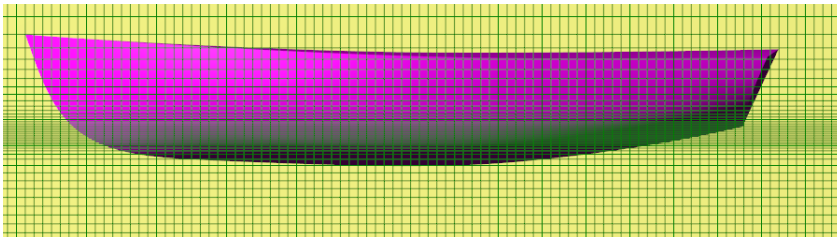


Модель яхты

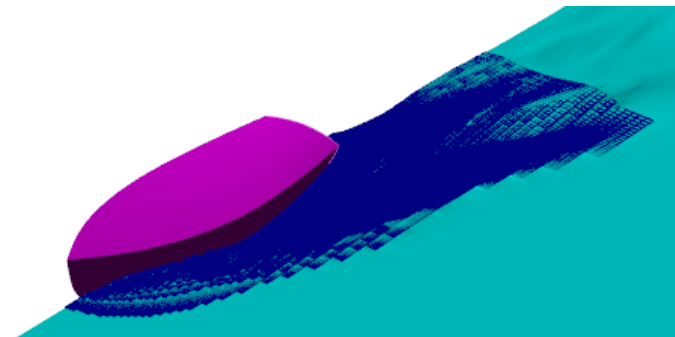


Задаются координаты центра масс яхты  
Задаются главные моменты инерции

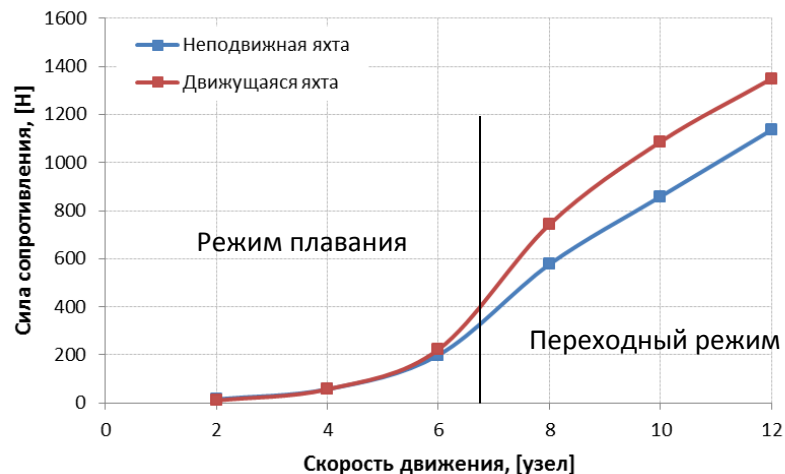
Задача решается в симметричной (половинной) постановке.  
Размеры расчетной области 52\*25\*15 м.  
Глубина водоема составляет 12 м.  
При расчете учитывается гравитация,  $g_z = 9.8 \text{ м/с}^2$   
Учитываются различные скорости течения



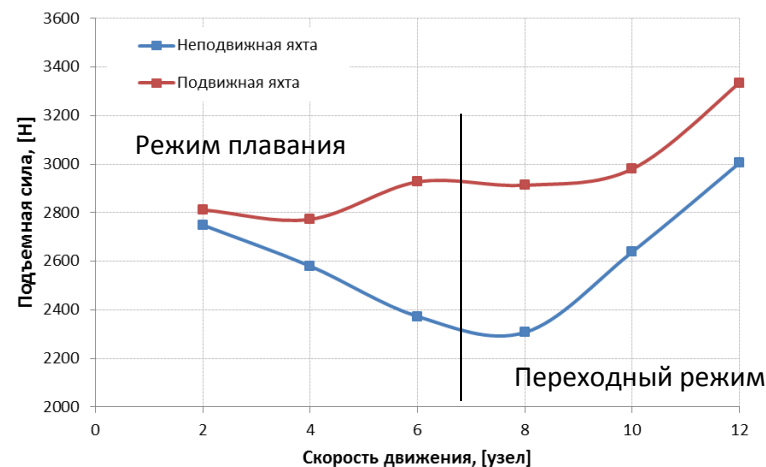
Начальная сетка  
Сетка 400 000 ячеек



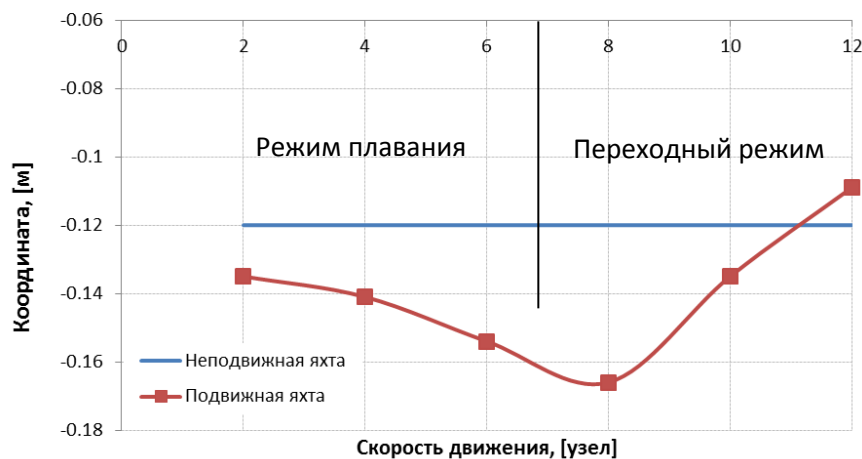
Проадаптированные ячейки  
Сетка 500 000 ячеек



Возрастание силы сопротивления при переходном режиме

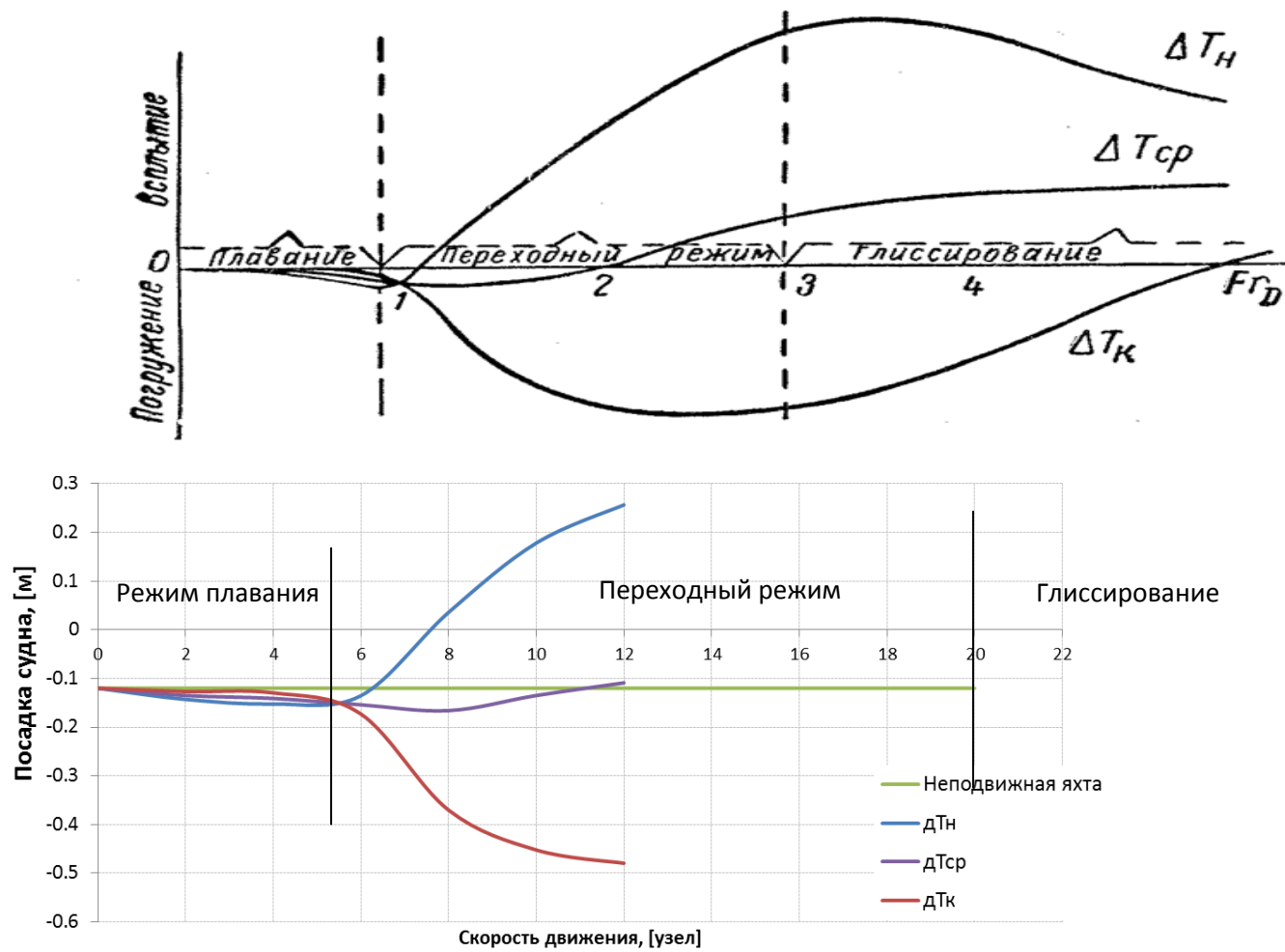


Возрастание гидродинамической силы поддержания при переходном режиме



Уменьшение осадки центра масс при переходном режиме

## Интегральные результаты расчета

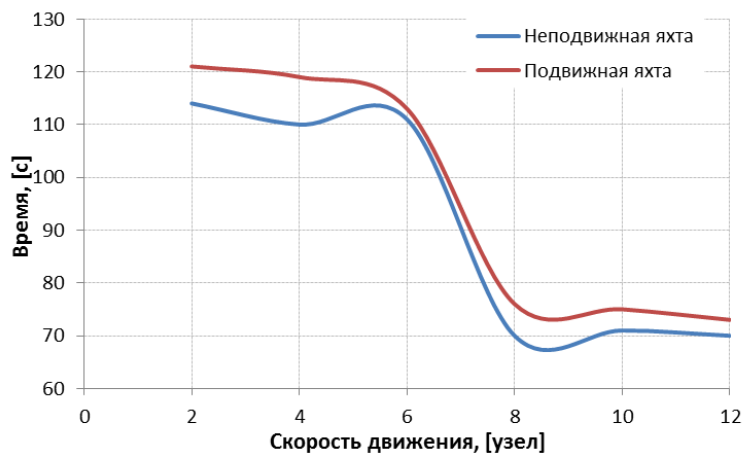


Уменьшение осадки при переходном режиме

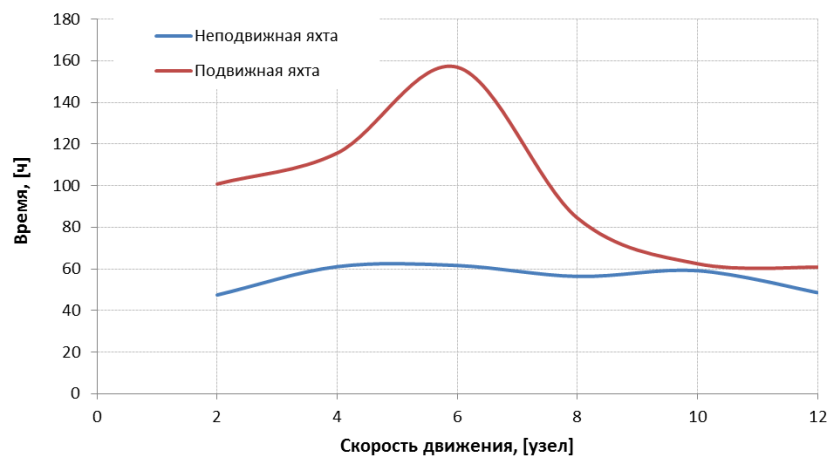




- Рабочая станция Intel Core i7 – 3820 CPU @ 3.60 ГГц, 3.60 ГГц, 32.0 ГБ RAM
- Гипертрейдинг включен
- Решаются одновременно две задачи по 4 ядра на задачу

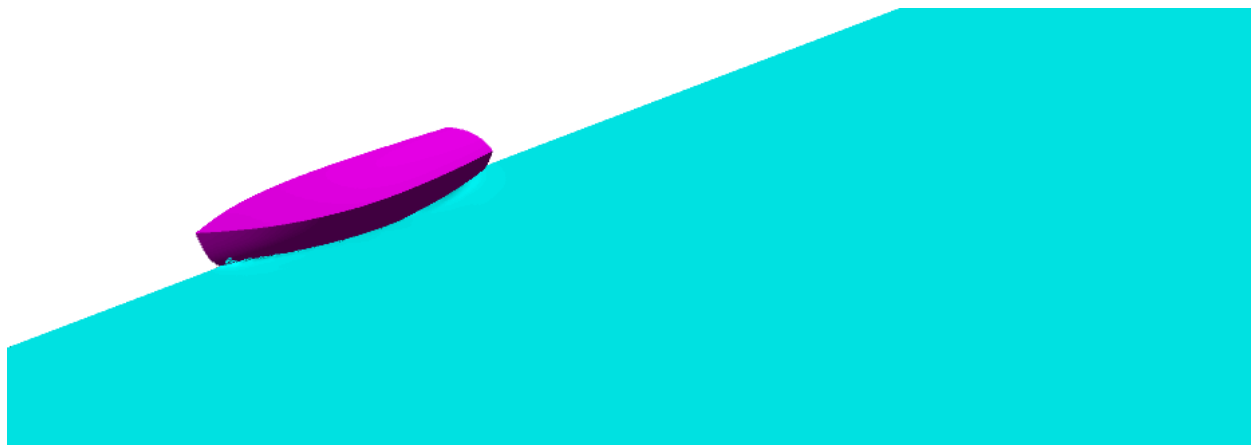


Время расчета одной итерации



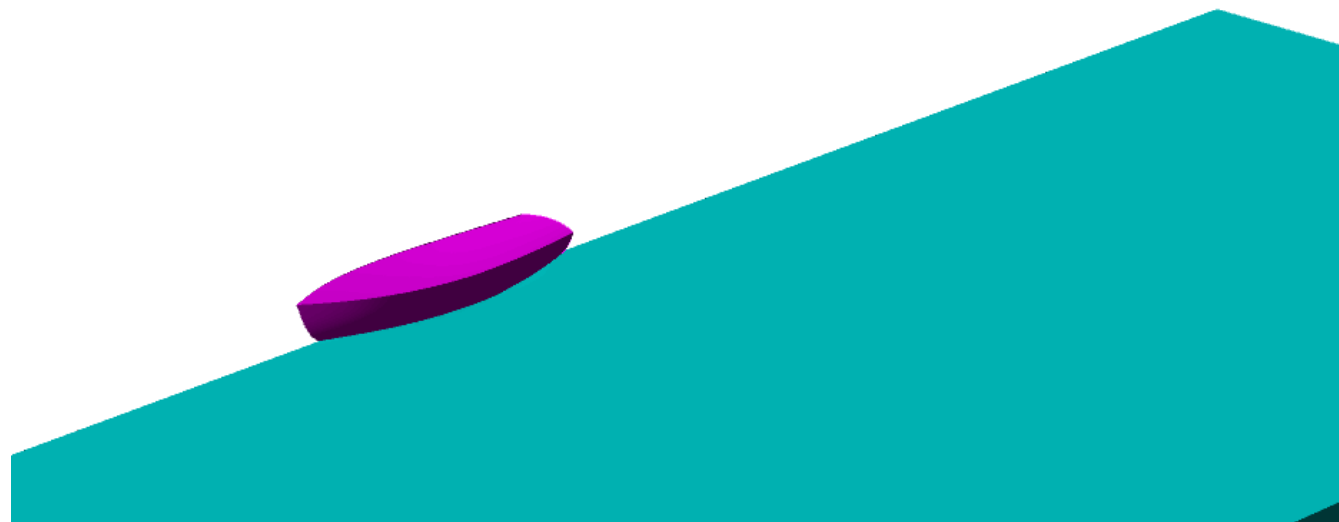
Общее время расчета варианта

На рабочей станции Intel Core i7 – 960 CPU @ 3.20 ГГц, 2.79 ГГц, 24.0 ГБ RAM время расчета увеличивается на 30% при тех же условиях расчета



Движущаяся яхта,  
скорость движения 12  
узлов

Неподвижная яхта,  
скорость движения 12  
узлов



## FlowVision позволяет определять

- Буксировочное сопротивление судна
- Начало переходного периода и глиссирования

## Чем может быть полезен FlowVision при проектировании яхты:

- Определение гидродинамических сил
- Определение площади смачиваемой поверхности
- Определение характеристик корпуса при нестандартных ситуациях – затопление отсеков, смещение ц.м. и прочее
- Исследование местной гидродинамики корпуса
- Задачи интеграции движителя и корпуса
- Исследование корпусов нестандартной формы, в том числе высокоскоростных и многосредних аппаратов
- Определение ветровой нагрузки на надстройку
- Верификация альтернативных расчетных методов