

Диссертация  
на соискание академической степени магистра

**Конечно-элементное исследование общей прочности  
корпуса высокоскоростного катамарана из  
углепластика**

Направление: 151600 – Прикладная механика  
Магистерская программа: 151600.68.01 – Вычислительная механика

Выполнила студентка группы 63602/2  
Руководитель, к.т.н., проф.  
Соруководитель, ассистент

Лагуткина А. Д.  
Боровков А. И.  
Немов А. С.



# Содержание

## - Композиционные материалы в судостроении

### - Объект исследования

### - Расчёт общей прочности согласно Нормативному Документу DNV\*

Постановки задач общей прочности

Расчёт основных нагрузок в задаче о прогибе

Прочность наиболее нагруженных конструкций в задаче о прогибе

Расчёт основных нагрузок в задаче о кручении

Прочность наиболее нагруженных конструкций в задаче о кручении

Расчёт основных нагрузок и прочность наиболее нагруженных элементов конструкции в задаче о боковой нагрузке

### - Расчёт параметров движения судна на волнах

Основные понятия гидродинамики волнового процесса

Гидростатический расчёт в ANSYS AQWA

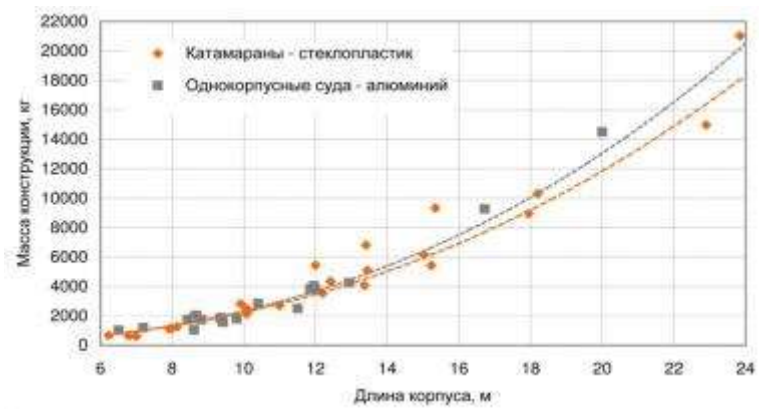
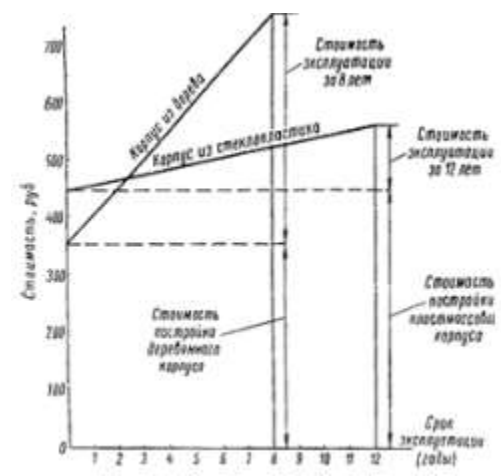
Оценки силовых и кинематических параметров при движении судна на волнении

### - Выводы

\* - Det Norske Veritas. Rules for classification of high speed, light craft and naval surface craft, 2012



## Композиционные материалы в судостроении



### Требования к ПКМ:

- Сохранение упругих и прочностных характеристик в заданных пределах в течение длительной эксплуатации в воде, min 20 лет;
- Высокий показатель усталости и ударопрочности;
- Технологические свойства, обеспечивающие возможность изготовления корпусных конструкций в заводских условиях;
- Стабильность по характеристикам и качеству изготовления конструкций;
- Ремонтоспособность в заводских условиях и в морских - в процессе эксплуатации.



## Объект исследования

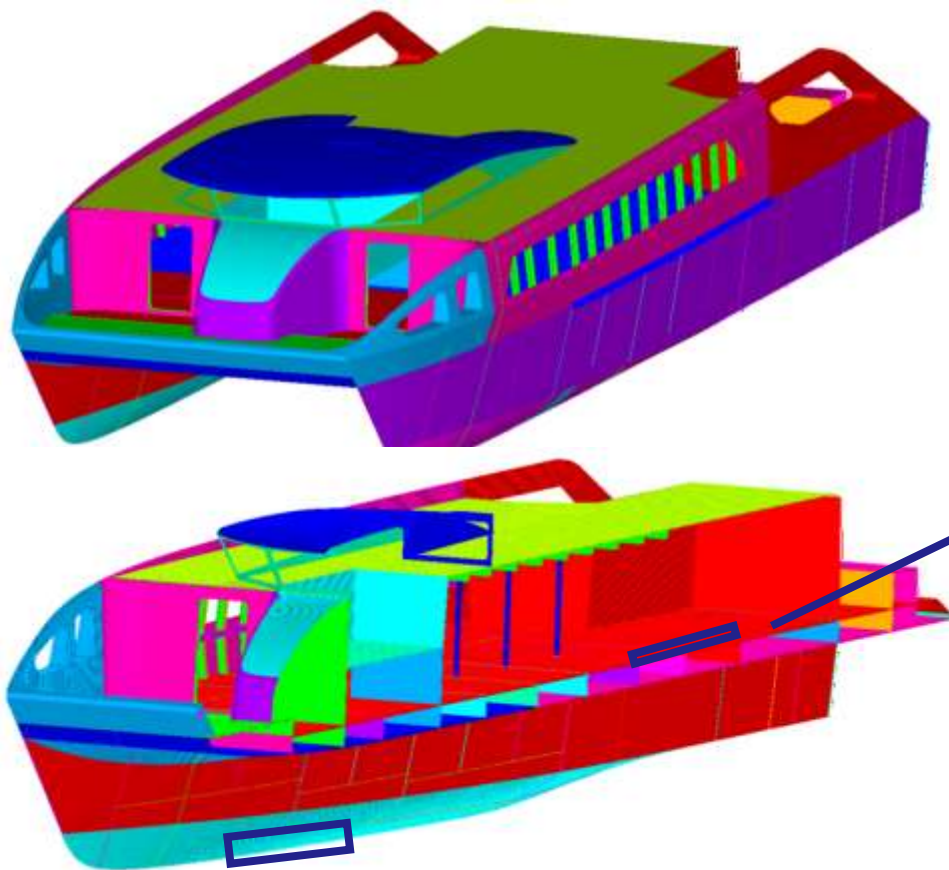
Высокоскоростной катамаран из углепластика:

$V=29.5$  уз.

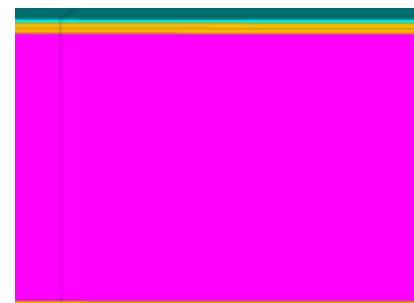
$\Delta=74.2$  т.

$L=23.8$  м.

Class notation – R2.



Фрагмент сечения КЭ модели  
главной палубы с учётом толщины –  
«трёхслойная» структура:

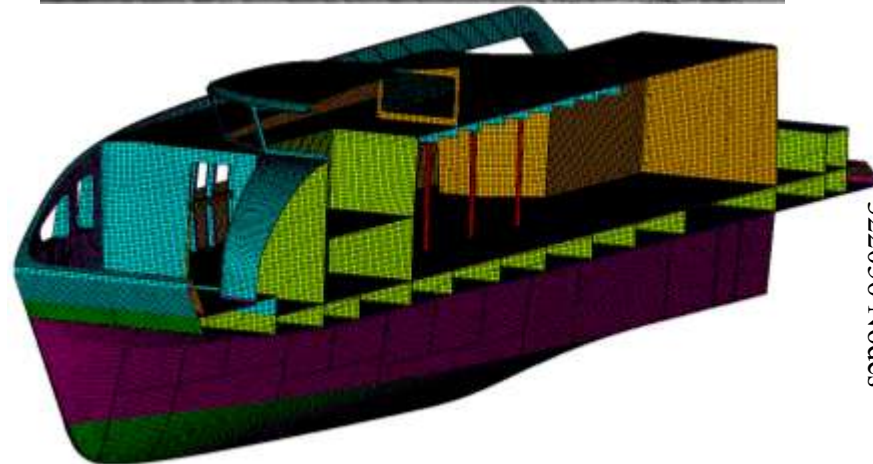
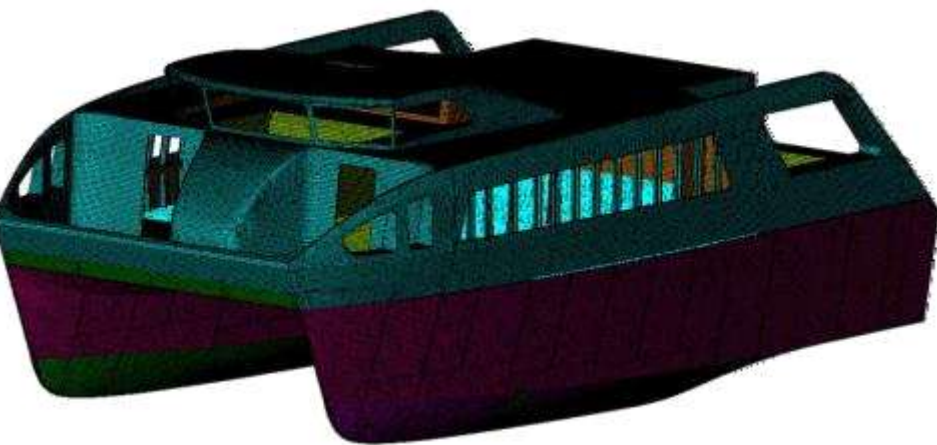


Послойная структура  
днища:



## Расчёт общей прочности

- Российский Морской Регистр Судоходства
- Норвежские Морские Правила Det Norske Veritas (DNV)



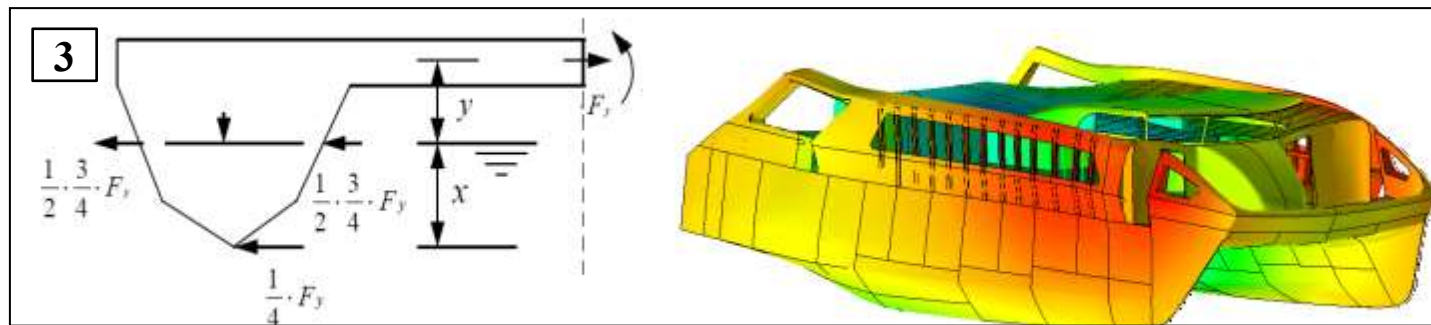
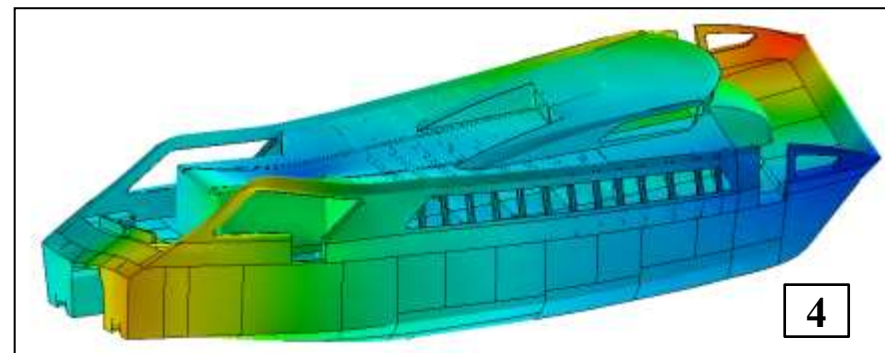
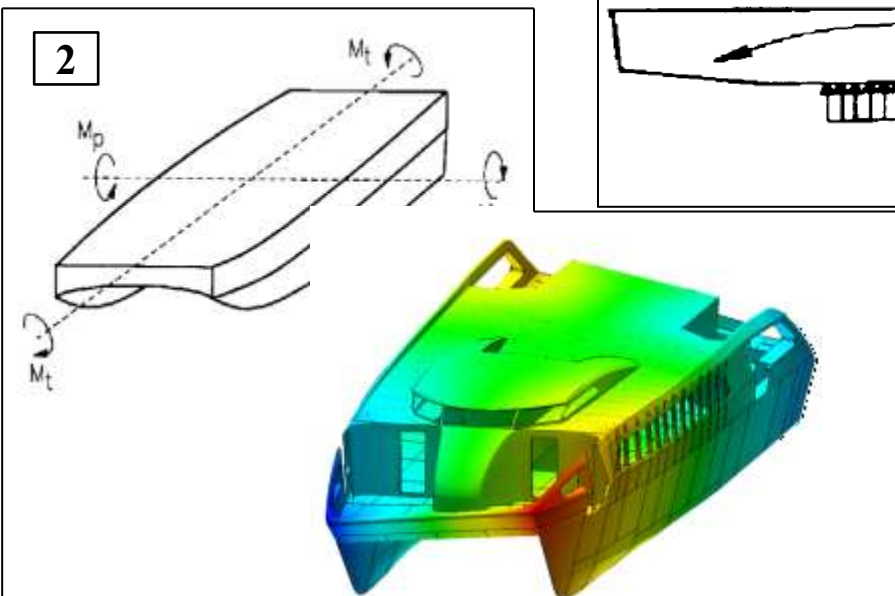
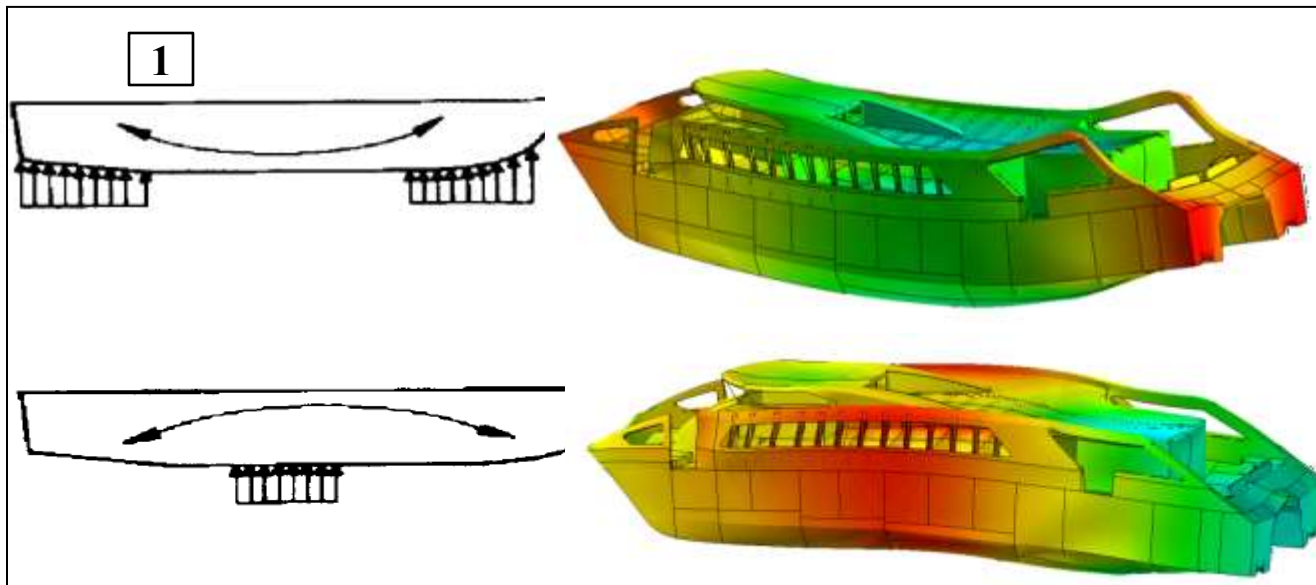
299159 Elements  
322056 Nodes

DNV:  
$$a_{cg} = \frac{v}{\sqrt{L}} \frac{3.2}{L^{0.76}} f_g g_0, \min a_{cg} = 1 \cdot g_0, a_{cg} = \frac{9.81m}{c^2},$$
 где  $f_g$  – коэффициент, зависящий от класса судна

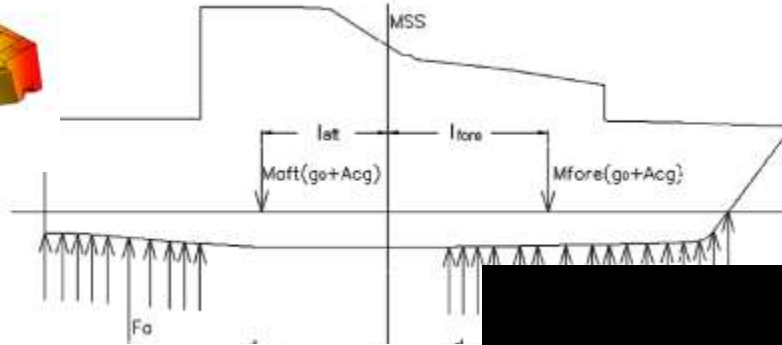
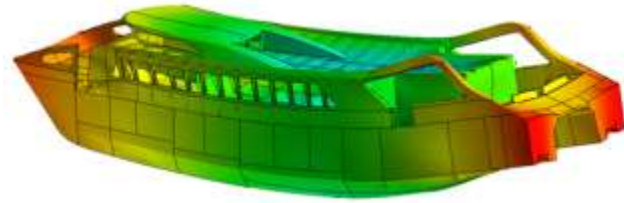


## Постановки задач общей прочности

- Общий изгиб 1
- Кручение 2
- Боковая нагрузка 3
- Кручение + изгиб 4



## Расчёт основных нагрузок в задаче о прогибе



Площадь приложения нагрузки:

$$A_{из} = kA \left( 1 + 0.2 \frac{a_{cg}}{g_0} \right) \quad (\text{м}^2)$$

$l_{aft} = 0.7$  длины судна  
 $l_{fore} = 0.85$  длины судна  
 $a_{cg}$  - максимальная вертикальная ускорения, вызываемая волнами (м/с<sup>2</sup>)  
 $g_0 = 9.81$  м/с<sup>2</sup>  
 $k$  - коэффициент судна

$$F_a + F_b = (M_{aft} + M_{fore})(g_0 + a_{cg})$$

$$F_a d_{aft} - M_{aft}(g_0 + a_{cg}) l_{aft} = F_b d_{fore} - M_{fore}(g_0 + a_{cg}) l_{fore}$$

$F_a$  - сила, действующая на кормовую часть днища .

$F_b$  - сила, действующая на носовую часть днища .

$M_{aft}, M_{fore}$  - соответственно массы частей судна кормовой и носовой .

$d_{aft}, d_{fore}$  - соответственно расстояния от продольного ЦТ судна до центра приложения сил на кормовой и носовой частях судна.

$l_{aft}, l_{fore}$  - соответственно расстояния от продольного ЦТ судна до центров тяжести кормовой и носовой части.

$$F_a = 258.031 \text{ kN}$$

$$F_b = 194.298 \text{ kN}$$



Критерий максимальных напряжений:

$$A = \max \left( \frac{\sigma_1}{X_T}, \left| \frac{\sigma_1}{X_C} \right|, \frac{\sigma_2}{Y_T}, \left| \frac{\sigma_2}{Y_C} \right|, \left| \frac{\tau_{12}}{S_{12}} \right| \right) \geq 1$$

$\sigma_1, \sigma_2, \tau_{12}$  – действующие в монослое напряжения,

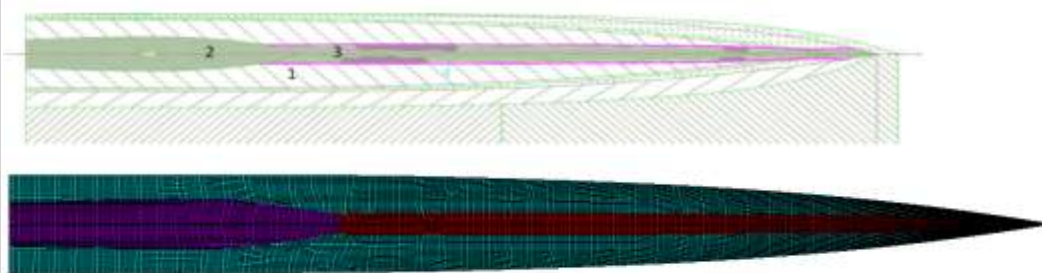
$X_T, X_C, Y_T, Y_C, S_{12}$  – разрушающие напряжения

Коэффициент запаса:  $\eta = \frac{1}{A}$

Коэффициент запаса согласно требованиям DNV:

Table C1 Failure strength ratio, R	
<i>Structural member</i>	<i>R</i>
Bottom panel exposed to slamming	3.3
Remaining bottom and inner bottom	3.3
Side structures	3.3
Deck structures	3.3
Bulkhead structures	3.3
Superstructures	3.3
Deckhouses	3.3
All structures exposed to long-term static loads (duration exceeding 3 months)	4.5

Структура днища:



1	2	3
2 x XC400	2 x XC400	2 x XC400
2 x BCU500	8 x BCU500	2 x BCU500
1 x M130	14 x QC800	8 x QC800
2 x BCU500	8 x BCU500	2 x BCU500
2 x XC400	2 x XC400	2 x XC400

Структура палубы:



1 x XC400

2 x BCU500

1 x M80

1 x BCU500

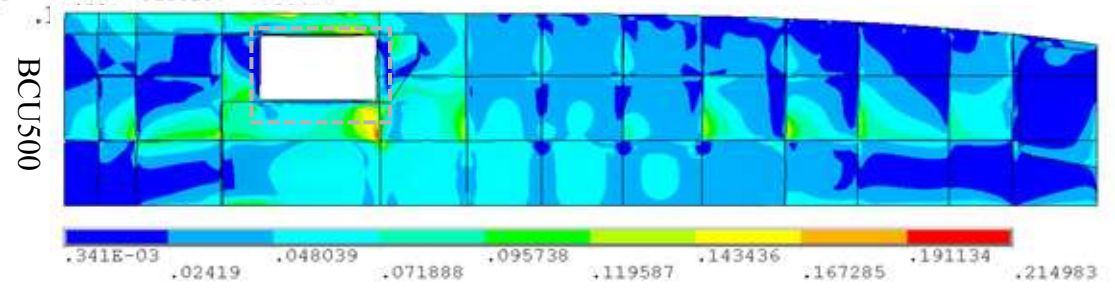
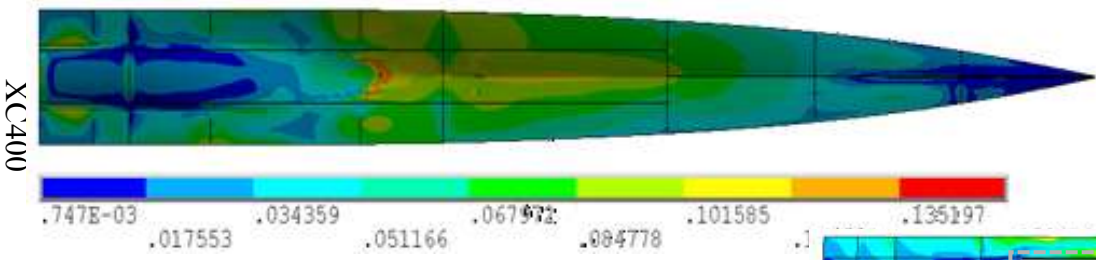
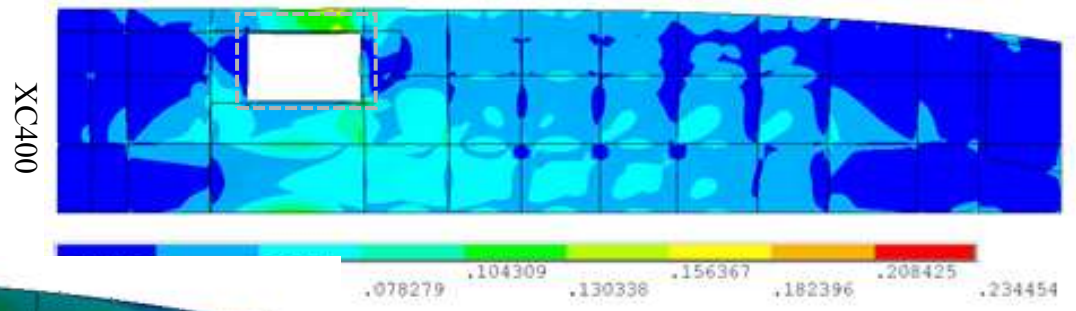
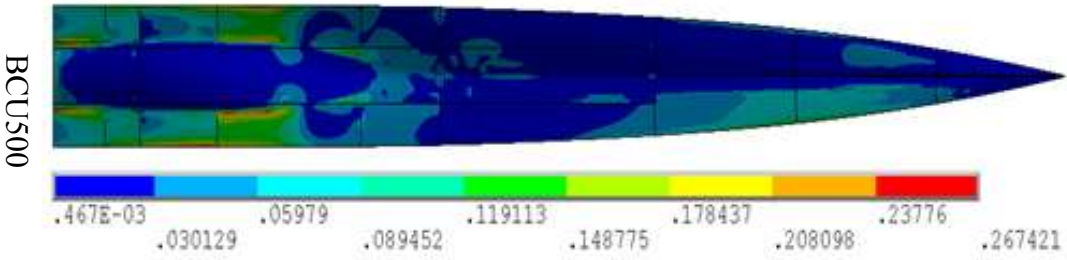




# Прочность наиболее нагруженных конструкций корпуса в задаче о прогибе

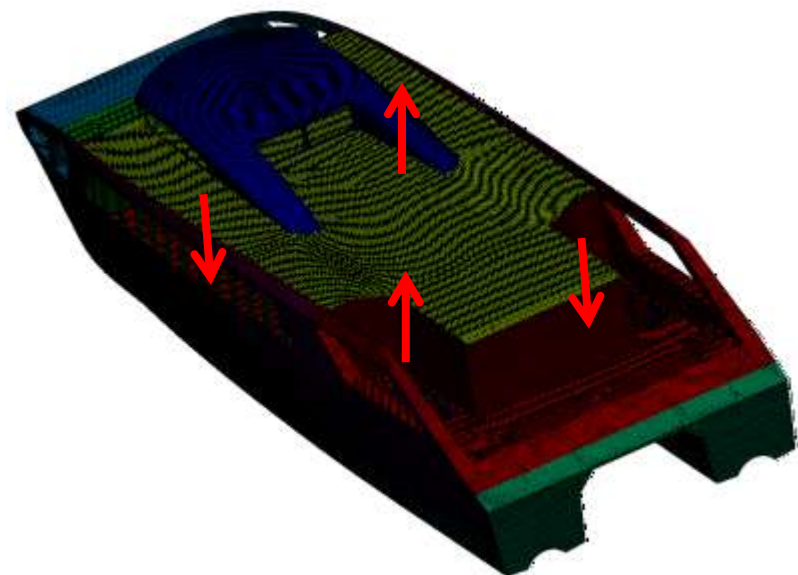
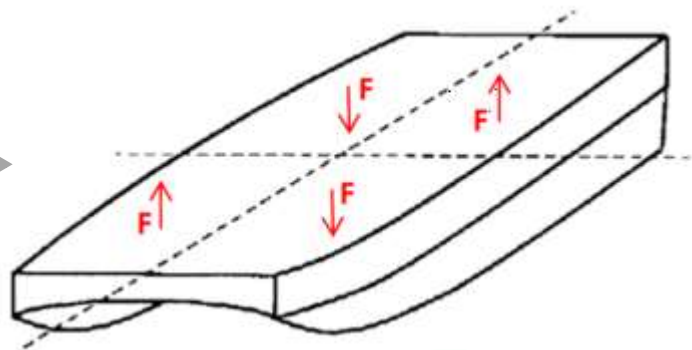
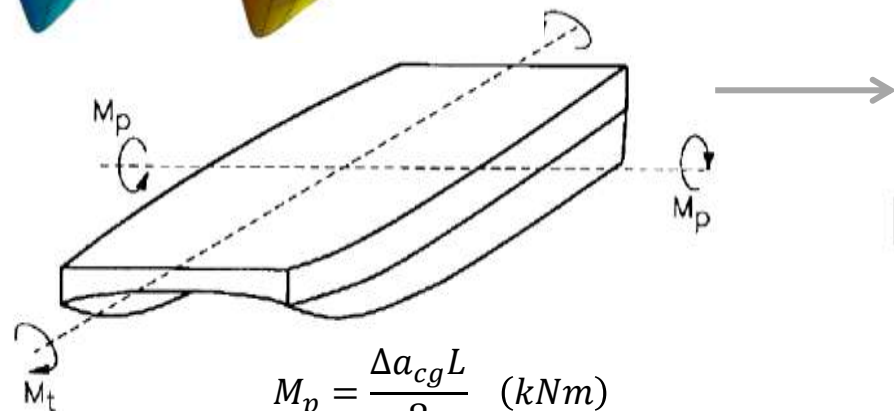
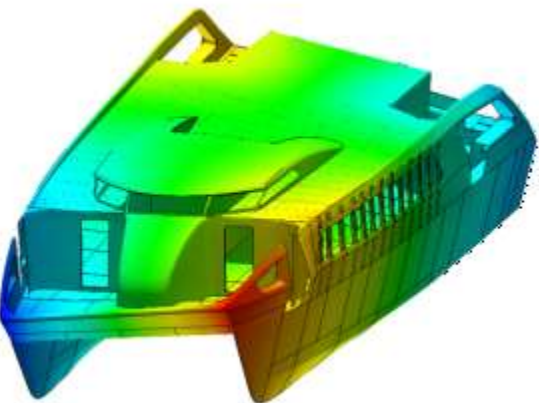
Критерий максимальных напряжений в наиболее нагруженных слоях днища:

Критерий максимальных напряжений в наиболее нагруженных слоях палубы:



$$\eta_{min} = 3.75$$

## Расчёт основных нагрузок в задаче о кручении



$$M_p = \frac{\Delta a_{cg} L}{8} \quad (kNm)$$

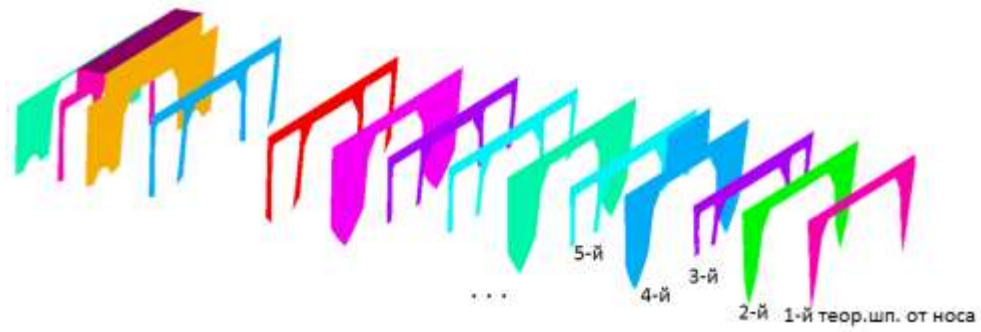
$$M_p = \frac{74.2 \cdot 9.81 \cdot 25.6}{8} = 2329 \text{ kNm}$$

$$M_t = \frac{\Delta a_{cg} b}{4} \quad (kNm)$$

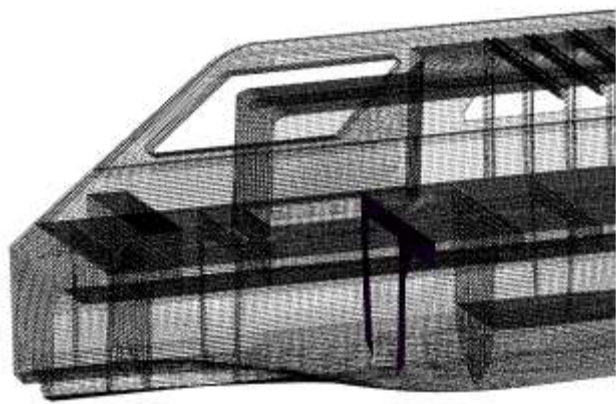
$b$  – расстояние между центральными линиями корпусов (м),  $b = 6.27$  м.

$$M_t = \frac{74.2 \cdot 9.81 \cdot 6.27}{4} = 1140 \text{ kNm}$$

# Прочность наиболее нагруженных конструкций корпуса в задаче о кручении



Критерий максимальных напряжений



1я переборка (11слой, QC800)



2я переборка (9слой, QC800)

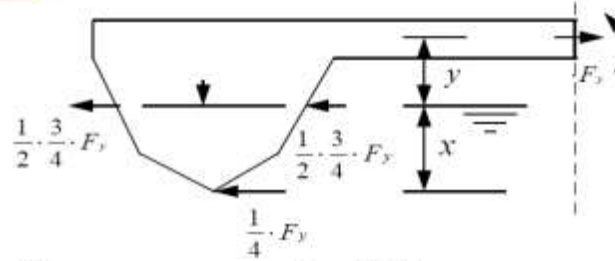
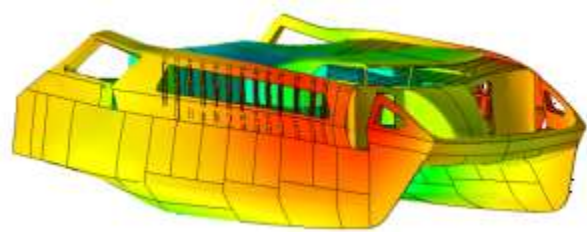


КЭ модель типовой переборки

$$\eta_{min} = 3.63$$



## Расчёт основных нагрузок и наиболее нагруженные элементы конструкции в задаче о боковой нагрузке



$$F_y = 3.25(1 + 0.0172 \frac{V}{\sqrt{L}}) L^{1.05} T^{1.30} (0.5 B_{WL})^{0.146} \left[ 1 - \frac{L_{BMAX}}{L} + \frac{L_{BMAX}}{L} \left( \frac{B_{MAX}}{B_{WL}} \right)^{2.10} \right] H_1 \quad (kN)$$

$$\frac{V}{\sqrt{L}} \leq 3$$

$$H_1 = \min \left\{ \frac{0.143B}{H_{S,MAX}}, H_1 = 1.2 \text{ м.} \right.$$

$B_{WL}$  – ширина корпуса судна по ватерлинии ( $B_{WL} = 8.71 \text{ м.}$ )

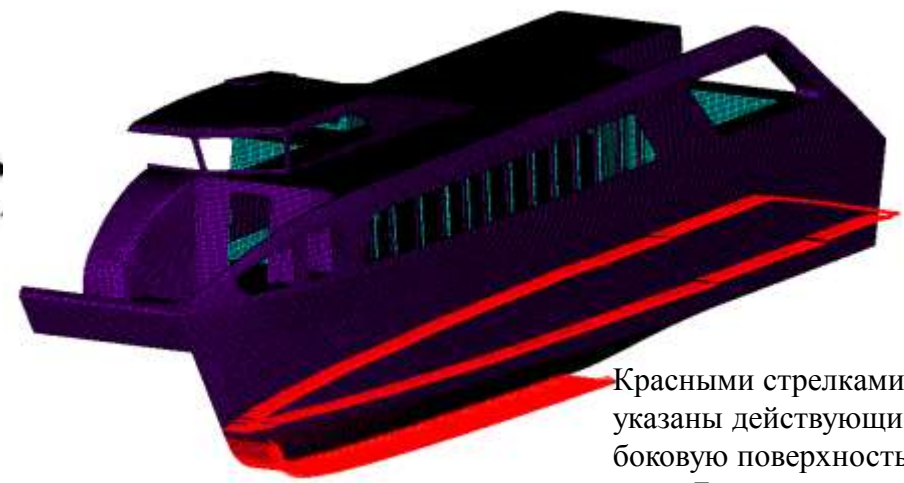
$B_{MAX}$  – максимальная ширина погружённой части корпуса.

$L_{BMAX}$  – длина судна в том месте, где  $\frac{B_{MAX}}{B_{WL}} > 1$ .

$H_{S,MAX}$  – максимальная значимая высота волны в акватории плавания судна.

$$F_y = 282.83 \text{ kN}$$

Схема реализации задачи:



Красными стрелками указаны действующие на боковую поверхность силы  $F_y$

Критерий максимальной напряжённости в переборке:



СУМ



СУМ

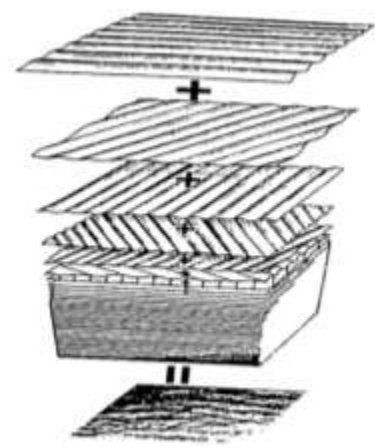
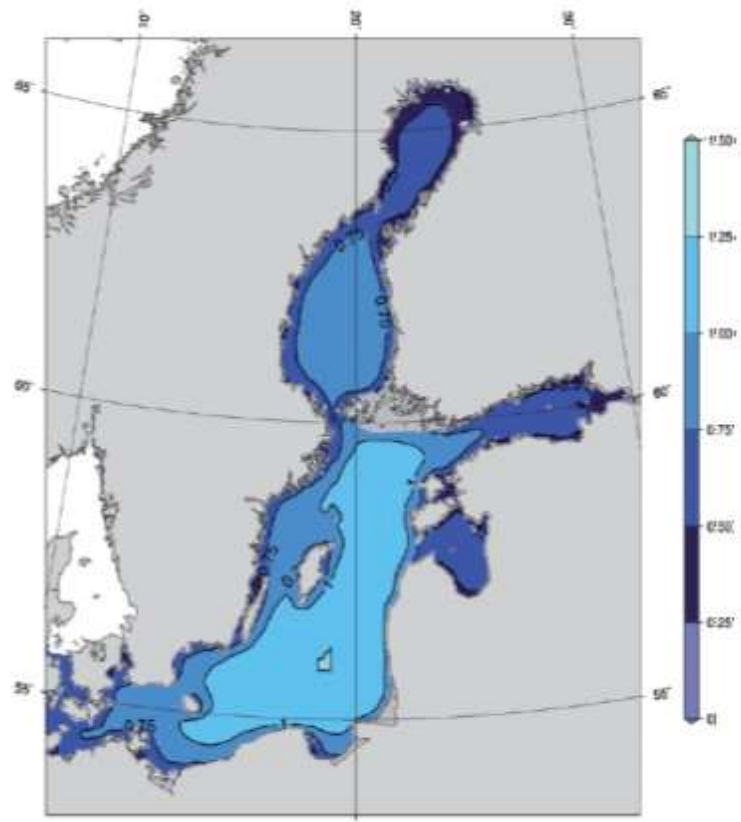


для переборки, ткань QС800

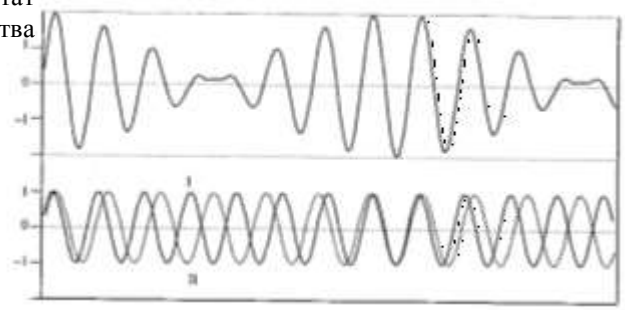




## Гидродинамики волнового процесса



Морское волнение как результат сложения большого количества гофрированных поверхностей.



Профиль волны как результат суммирования двух синусоидальных волн. Верхний профиль равен сумме двух простых волн, показанных на нижней части рисунка.

Долгосрочные статистические данные по значимой высоте волн в Балтийском море\*, м

Linear wave, airy waves:

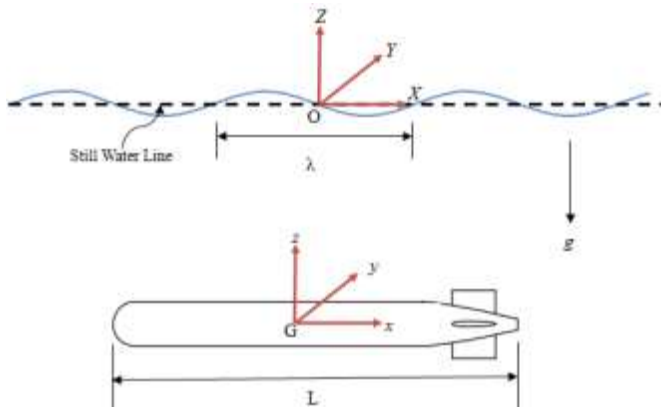
$$\xi(X, Y, t) = a_w e^{i[-\omega t + k(X \cos \chi + Y \sin \chi) + a]}$$

Stokes 2nd Order Waves:

$$\xi(X, Y, t) = \xi^{(1)}(X, Y, t) + \xi^{(2)}(X, Y, t) = a_w e^{i[-\omega t + k(X \cos \chi + Y \sin \chi) + a]} + \frac{1}{4} \frac{k^2 a_w^2}{g} \frac{\cosh(kd)}{\sinh^3(kd)} [2 + \cosh(2kd)] e^{i[-\omega t + 2k(X \cos \chi + Y \sin \chi) + 2a]}$$

\* -Wave hindcast statistics in the seasonally ice-covered Baltic sea. Boreal environment research, Tuomi, L., Kahma, K. K., & Pettersson, H. , 2011

## Основные понятия гидродинамики волнового процесса



$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0$$

$$\mathbf{v} = \nabla \varphi$$

$$\Delta \varphi = 0$$

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} = g - \frac{1}{\rho} \nabla p$$

$$\nabla \left( \frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{(\nabla \varphi)^2}{2} + gz + \frac{p}{\rho} \right) = 0$$

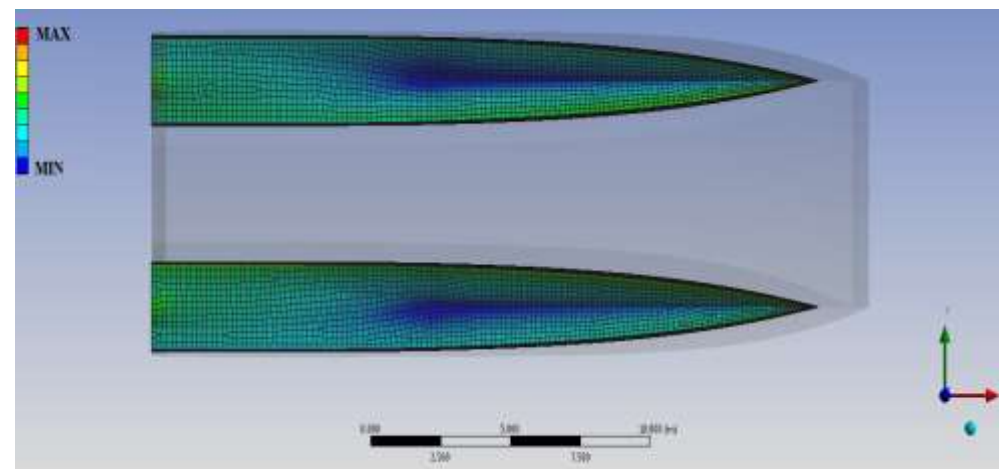
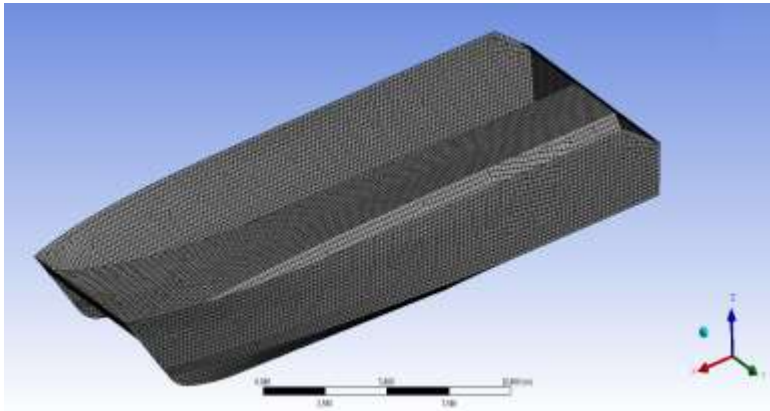
$$\xi(x, y, t) = -\frac{1}{g} \left( \frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{(\nabla \varphi)^2}{2} \right)_{z=\xi}$$

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial \varphi}{\partial x} \frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{\partial \varphi}{\partial y} \frac{\partial \xi}{\partial y} = \frac{\partial \varphi}{\partial z} \text{ при } z = \xi(x, y, t)$$

$$\left[ \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right]_{z=-d} = 0$$

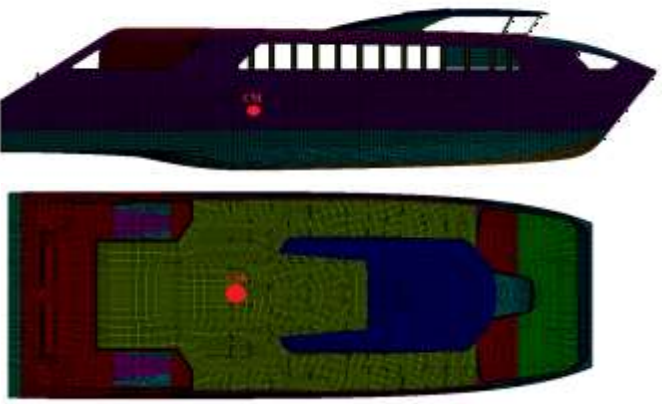
$$\varphi(x, y, t) = \frac{-iag \cosh[k(z+d)]}{\omega \cosh[kd]} e^{i[-\omega t + k(x \cos \chi + y \sin \chi) + \alpha]}$$

## Гидростатический расчёт в ANSYS AQWA

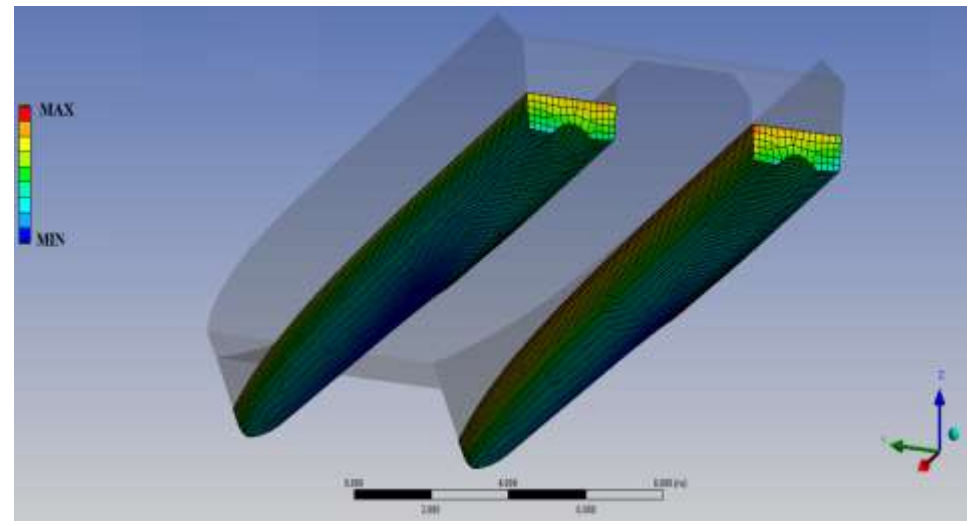


Координаты Центра Масс, вычисленные с помощью ANSYS AQWA:

$X_c=9.917$   
 $Y_c=6.15e-2$   
 $Z_c=2.335$

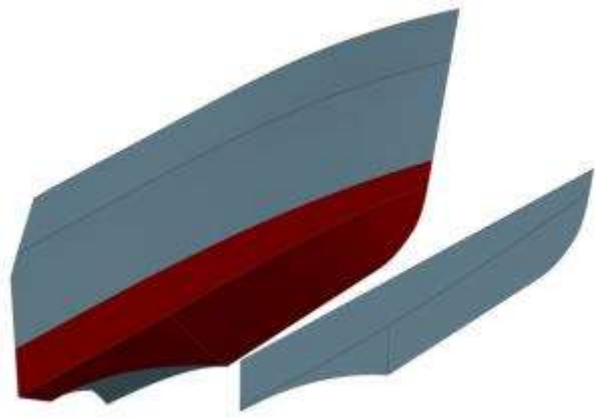


$\delta \approx 0.1\%$



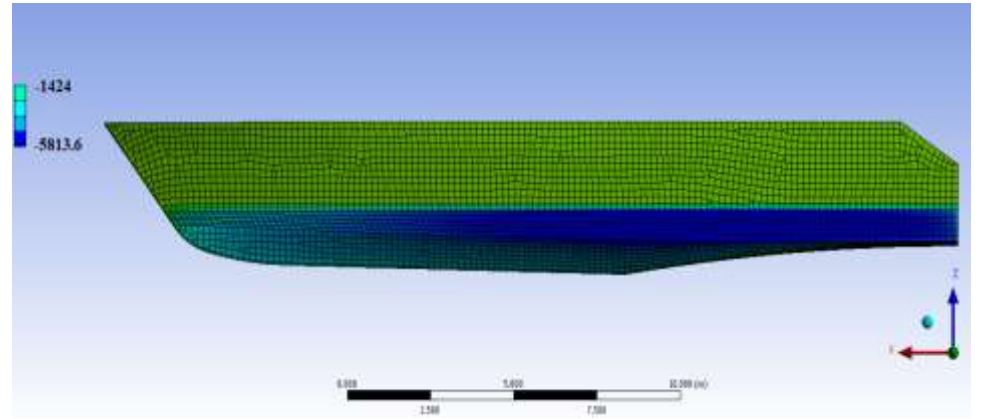
Гидростатическое давление

# Оценки силовых и кинематических параметров при движении судна на волнении. Задача о поперечном воздействии волн на корпус судна.



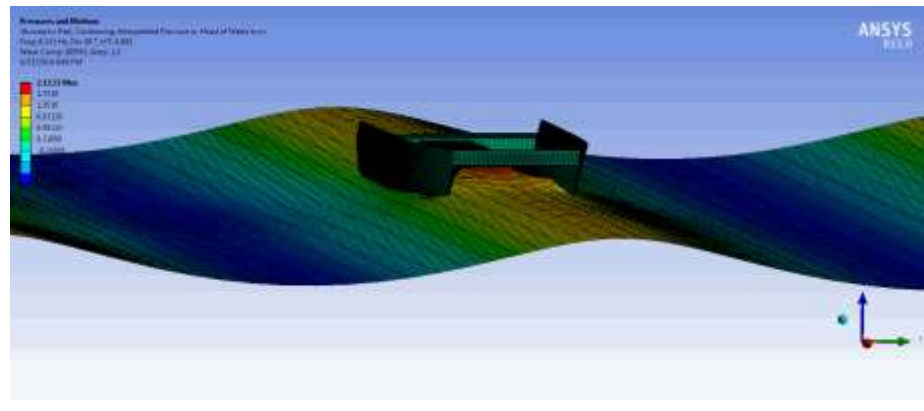
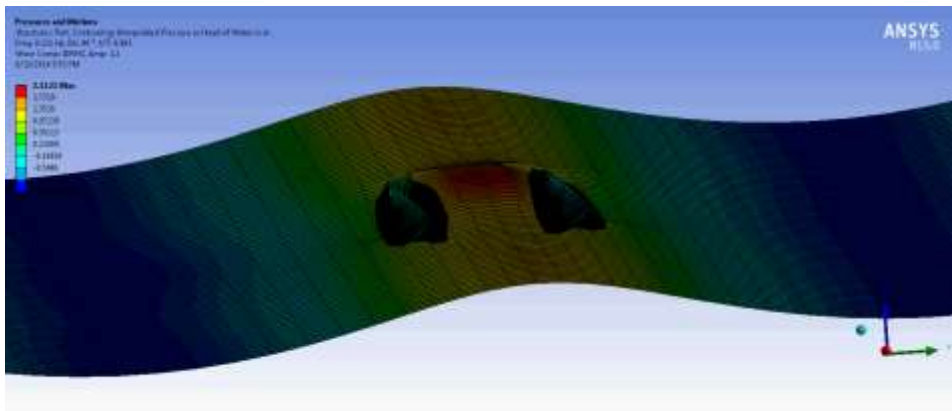
$H_S = 1.2$  м  
 $\nu = 0.22$  Гц

$F_y = 152.5$  кН



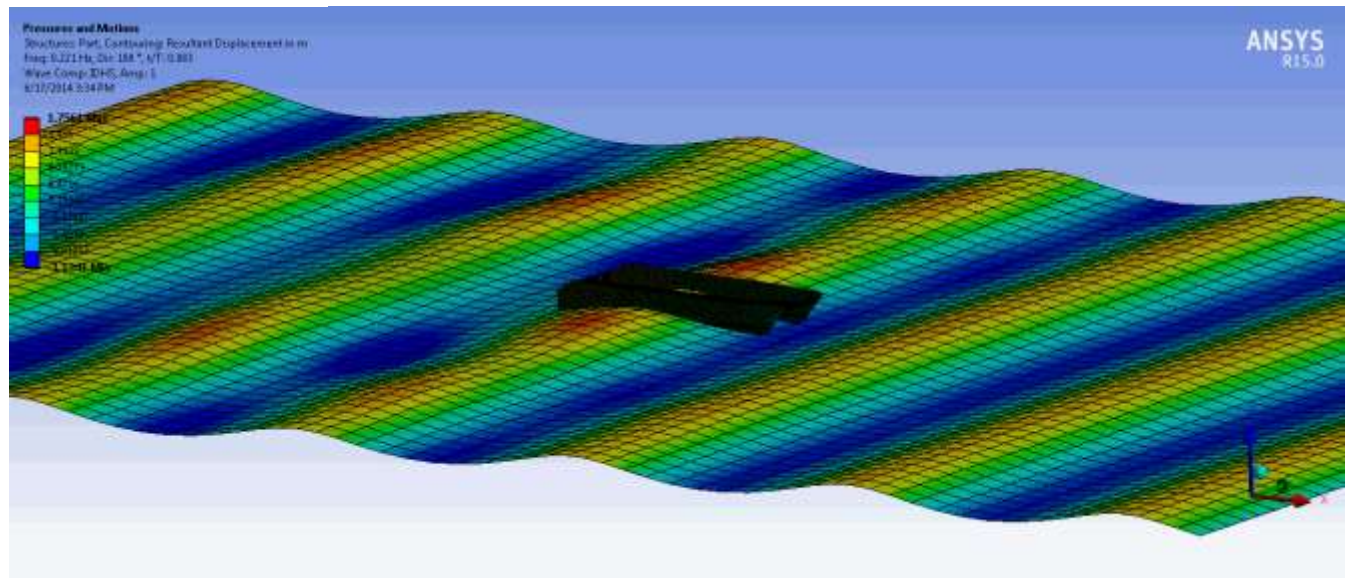
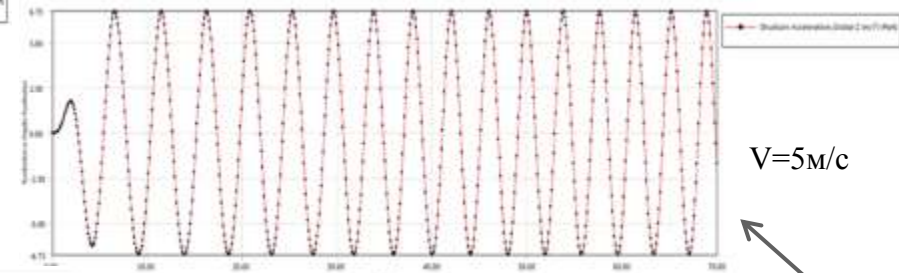
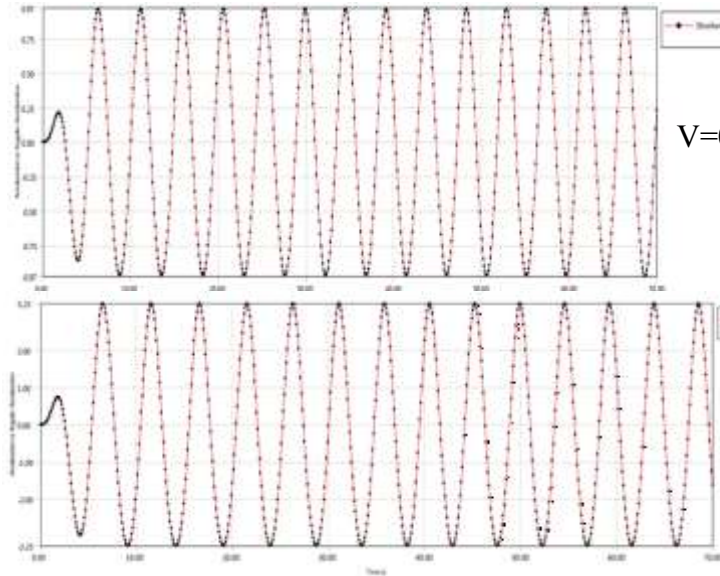
Давление, создаваемое волной в направлении Y, Па

$F_y^* = 282.83$  кН в задаче о поперечной нагрузке волн





# Оценки силовых и кинематических параметров при движении судна на волнении. Продольное воздействие волн на корпус судна.





## Выводы:

- Выполнен расчет вертикальных ускорений, являющихся основополагающей нагрузкой для многих задач общей прочности согласно правилам основных морских классификационных сообществ.
- Предложены КЭ постановки и решены для скоростного катамарана из углепластика задачи общей прочности – об изгибе, кручении и о поперечном воздействии волн.
- Проанализировано напряженно-деформированное состояние наиболее нагруженных элементов корпуса в каждой задаче. Определены слои углепластика, в которых наблюдается наименьший коэффициент запаса, а также предложены необходимые усиления, позволившие обосновать прочность корпуса катамарана.
- Рассмотрены вопросы силового взаимодействия волн и корпуса катамарана на основе классической теории гидродинамики волн.
- Оценено усилие, создаваемое волнами на борт катамарана при поперечном воздействии волн.
- Рассчитаны параметры движения судна по поверхности воды при наличии продольных волн, рассмотрены различные скорости судна, получены характеристики вертикальных перемещений, скоростей и ускорения судна при таком движении.